



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

OPTIMIZAÇÃO DA ESTRUTURA DE REFORÇO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA SHELL

Hugo Bretas de Oliveira Cabrita

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso

Co-orientador: Doutor Eurico Emanuel Teixeira de Almeida

Lisboa

2010

AGRADECIMENTOS

Finalizada uma etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o mais profundo agradecimento a todos aqueles que sempre me apoiaram nesta longa caminhada.

Ao Professor Doutor João Cardoso, o meu agradecimento por toda a sua disponibilidade e orientação prestada, pela sua dedicação, pelo seu entusiasmo e por todo o conhecimento que me transmitiu nestes últimos meses.

Ao Doutor Emanuel Teixeira, pela oportunidade que me deu de trabalhar com uma das mais reconhecidas e respeitadas empresas portuguesas, a EFACEC.

A todos os meus amigos pelo apoio e palavras de incentivo que têm demonstrado nestes últimos anos. Dirijo um especial agradecimento à minha amiga Indira Jassi, que com a sua contagiante força interior sempre conseguiu motivar-me.

Como não poderia deixar de ser dirijo o meu maior agradecimento à minha família, o meu pai Francisco Teodósio Cabrita, a minha mãe Solange Bretas de Oliveira, o meu irmão Guilherme Bretas de Oliveira Cabrita, a minha irmã Maria Lídia Leitão Correia Cabrita e mãe dela Maria Lídia Lopes Leitão Correia. Obrigado pelo apoio incondicional que sempre me deram, por fazerem parte da minha vida e por serem parte daquilo que hoje sou.

Hugo Bretas de Oliveira Cabrita

Lisboa, 28 de Setembro de 2010

RESUMO:

O objectivo desta dissertação consiste em criar um sistema de cálculo genérico que permita minimizar a massa da estrutura de reforço dos transformadores SHELL fabricados pela empresa EFACEC.

Quando ocorre um curto-circuito as pressões internas transmitidas pelo núcleo do transformador ao tanque que o contém aumentam significativamente, pelo que o correcto dimensionamento da estrutura de reforço é crucial para a integridade estrutural e segurança em redor do mesmo.

Durante o processo de optimização pontos específicos da estrutura têm de satisfazer constrangimentos de tensão e deslocamento, por isso foram desenvolvidos dois modelos de optimização distintos, denominados de “modelo de elementos finitos” e “modelo analítico”. Ambos utilizam os algoritmos genéticos e algoritmos baseados em gradientes presentes no programa MATLAB para minimizar a massa da estrutura, porém, recorrem a técnicas diferentes para calcular as tensões e o deslocamento. O primeiro usa o método dos elementos finitos com recurso ao programa ANSYS, enquanto o modelo analítico utiliza equações baseadas na teoria de vigas.

Foi também desenvolvida uma interface gráfica que permite uma fácil utilização de ambos os modelos sem que seja necessário recorrer à linha de comandos do MATLAB.

Palavras-chave: Método dos elementos finitos, teoria de vigas, optimização estrutural, algoritmos genéticos, algoritmos baseados no gradiente, ANSYS, MATLAB.

ABSTRACT:

The main objective of this thesis is to create a generic calculus system that minimizes the mass of the structure that reinforces SHELL power transformers made by EFACEC.

When a short-circuit occurs the internal pressure transmitted by the transformer's core to the tank that contains it increases significantly, thus the correct design of this structure is crucial to the structural integrity of the transformer and safety around it.

During the optimization process specific points of the structure have to satisfy constraints of stress and displacement, therefore, two different models of optimization were developed, the "finite element model" and the "analytical model". Both use genetic algorithms and gradient based algorithms in the software MATLAB to minimize the mass of the structure, but use distinct techniques to calculate the stress and displacement in those specific points. The first model uses the finite element method by using the ANSYS software package, while the analytical model uses beam theory based equations.

A graphical user interface was also developed to allow an easy use of the optimization system.

Keywords: *Finite element method, beam theory, structural optimization, genetic algorithms, gradient based algorithms, ANSYS, MATLAB.*

SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES

AG's: Algoritmos Genéticos.

AGS: Algoritmo Genético Simples.

APDL: ANSYS Parametric Development Language.

A_v : Área de secção.

A_x : Área placa.

CC: curto-circuito.

D_n : Distância do eixo neutro à placa interior.

E: Módulo de Elasticidade.

FCC: Força de curto-circuito.

G: Módulo de Distorção.

GR: Grande Reforço.

GROPTI: Grande Reforço Optimizado.

I: Momento de inércia. ,

i_{CC} : Corrente de curto-circuito.

i_N : Corrente nominal.

i_p : Corrente primária.

i_s : Corrente secundária.

k_t : Coeficiente de Timoshenko.

M: Momento Flector.

MEF: Método dos elementos finitos.

N: Esforço axial.

PQS: Programação Quadrática Sequencial.

Q: Carga Distribuída.

TE: Transformador trifásico entre fases.

TM: Transformador monofásico. ,

TT: Transformador trifásico.

V: Esforço Transverso.

Z: Módulo resistente.

Z_{CC} : Impedância de curto-circuito.

Z_N : Impedância nominal.

ϕ : Fluxo Magnético.

μ : Permeabilidade do material.

ÍNDICE

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objectivos	1
1.3. Organização da dissertação	2
Capítulo 2 - Optimização Estrutural.....	4
2.1. Formulação genérica de um problema de optimização	6
2.2. Formulação do problema de optimização do GR.....	7
2.2.1. Estrutura estudada	7
2.2.1.1. Parâmetros de projecto	7
2.2.1.2. Variáveis de projecto	9
2.2.1.3. Constrangimentos	10
2.2.2. Força de curto-circuito.....	12
2.2.3. Representação formal do problema	13
2.3. Algoritmos de optimização	14
2.3.1. Algoritmos genéticos.....	14
2.3.1.1. Codificação das Variáveis	15
2.3.1.2. Avaliação do Mérito	16
2.3.1.3. Operadores Genéticos Fundamentais	16
2.3.2. Algoritmo Baseado no Gradiente	20
2.3.3. Algoritmo Híbrido	21
Capítulo 3 - Modelo de Elementos Finitos.....	23
3.1. Interface ANSYS-MATLAB	23
3.1.1. Diagrama de processo e sequência de operações	24
3.2. Modelo do GR parametrizado em APDL.....	24
3.2.1. Malha de elementos finitos.....	25
3.2.2. Geometria	26
3.2.2.1. Simetria.....	27
3.2.2.2. Cutelos	27
3.2.3. Carregamentos	28
3.3. Avaliação dos constrangimentos.....	29
Capítulo 4 - Modelo Analítico	31
4.1. Equações do modelo analítico.....	31

4.1.1. Equações baseadas na teoria de vigas.....	32
4.1.1.1. Deslocamentos.....	36
4.1.1.2. Tensões.....	37
4.1.1.3. Áreas de secção e momentos de inércia.....	38
4.1.1.4. Massa.....	39
4.1.2. Cálculo da tensão e deslocamento na placa interior da VIGA 1.....	40
4.1.2.1. Fórmulas de <i>Roark</i>	40
4.1.2.2. Fórmula de <i>Dubbel</i>	42
Capítulo 5 - Interface GROPTI	43
5.1.1. Estrutura de ficheiros.....	43
5.1.1.1. Pasta de resultados e ficheiros de output.....	43
5.1.2. Interface gráfica GROPTI	44
5.1.3. Criar uma nova análise	46
Capítulo 6 - Resultados.....	47
6.1. Determinação da dimensão ideal do elemento para o MEF.....	48
6.1.1. Transformador Monofásico	50
6.1.1.1. Dimensões globais, espessuras e FCC.....	50
6.1.1.2. Resultados TM.....	50
6.1.2. Transformador TRIFÁSICO	51
6.1.2.1. Dimensões globais, espessuras e FCC.....	51
6.1.2.2. Resultados TT.....	51
6.1.3. Transformador ENTREFASES	52
6.1.3.1. Dimensões globais, espessuras e FCC.....	52
6.1.3.2. Resultados TE.....	52
6.2. Análise de resultados.....	53
Capítulo 7 - Conclusões	55
Referências	56
Anexos	57
7.1. Ficheiro APDL	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Tanque transformador monofásico	7
Fig. 2.2 - Vista geral	7
Fig. 2.3 - Esquema grande reforço	8
Fig. 2.4 - Força de curto-circuito	8
Fig. 2.5 - Cutelos VIGA 1	9
Fig. 2.6 - Cortes secção VIGA 1 e VIGA 2	10
Fig. 2.7 - Zonas de avaliação dos constrangimentos	11
Fig. 2.8 - Esquema transformador	12
Fig. 2.9 - Corte núcleo de ferro	12
Fig. 2.10 – Método da Roleta	17
Fig. 2.11 – Método Stochastic Uniform	18
Fig. 2.12 - Amostra de cromossomas	18
Fig. 2.13 – Cruzamento “one point”	19
Fig. 2.14 - Cruzamento “two Point”	19
Fig. 2.15 - Cromossoma depois da mutação.....	19
Fig. 3.1 - Sequência de processos e operações	24
Fig. 3.2 - Elemento shell181	25
Fig. 3.3 - GR - malha grosseira	26
Fig. 3.4 - GR - malha fina.....	26
Fig. 3.5 - GR's correspondentes a valores diferentes dos parâmetros	27
Fig. 3.6 - Constrangimento de simetria VIGA 1	27
Fig. 3.7 - GR com seis cutelos (NC=6)	28
Fig. 3.8 - GR com quatro cutelos (NC=4).....	28
Fig. 3.9 - GR com cinco cutelos (NC=5).....	28
Fig. 3.10 - GR sem cutelos (NC=0).....	28
Fig. 3.11 - Pressão na face interna da VIGA 1	29
Fig. 3.12 - Ponto de avaliação da tensão na placa interior para NC ímpar.....	29
Fig. 3.13 - Ponto de avaliação da tensão na placa interior para NC par ou zero	30
Fig. 3.14 - Tensões e deslocamento centro e canto VIGA 1	30
Fig. 4.1 – Modelo simplificado do GR.....	32
Fig. 4.2 - Condições fronteira de simetria - GR	32
Fig. 4.3 - Carregamentos Teorema Castigliano.....	33

Fig. 4.4 - Rotação ponto C – carga distribuída.....	34
Fig. 4.5 - Rotação ponto C - carga unitária	34
Fig. 4.6 - Esquema auxiliar para cálculo de momentos de inércia	38
Fig. 4.7 - Placa interior sujeita a pressão uniforme	40
Fig. 4.8 – Condições fronteira VIGA 1	40
Fig. 4.9 - Área real a dimensionar	41
Fig. 4.10 - VIGA 1 - 2 Cutelos e placa 5 ausente.....	41
Fig. 5.1 - Interface gráfica GROPTI.....	44
Fig. 5.2 - Ficheiro de parâmetros.....	46
Fig. 6.1 - Curva tensão - deformação aço 275S	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros de projecto	9
Tabela 2.2 - Espessuras admissíveis.....	10
Tabela 2.3 - Valores admissíveis.....	11
Tabela 2.4 – Variáveis GR não codificadas	15
Tabela 2.5 - Variáveis GR codificadas.....	15
Tabela 2.6 - Solução <i>FMINCON</i> - <i>Active Set</i>	21
Tabela 2.7 - Valores admissíveis AG - Híbrido	21
Tabela 2.8 - Solução final algoritmo híbrido.....	22
Tabela 4.1 - Equações das reacções do GR.....	35
Tabela 5.1 - Estrutura de ficheiros GROPTI.....	43
Tabela 5.2 - Nome pasta resultados.....	44
Tabela 5.3 - Ficheiros resultantes	44
Tabela 6.1 - Pontos curva tensão - deformação	48
Tabela 6.2 - Tensões e desloc. finais para diferentes dimensões do elemento no MEF.....	49
Tabela 6.3 - Variáveis de projecto finais para diferentes dimensões do elemento no MEF	49
Tabela 6.4 - Características solução actual - TM	50
Tabela 6.5 - Resultados - TM	50
Tabela 6.6 - Características solução actual - TT	51
Tabela 6.7 - Resultados - TT	51
Tabela 6.8 - Características solução actual - TE	52
Tabela 6.9 - Resultados - TE	52

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A EFACEC, empresa criada em 1905, actualmente com cerca de 4500 colaboradores e um volume de negócios que ultrapassa os mil milhões de euros é hoje o maior Grupo Eléctrico Nacional de capitais portugueses e um dos líderes mundiais no fabrico de transformadores de potência.

Os seus transformadores são reconhecidos internacionalmente como produtos de elevada qualidade. Estas máquinas altamente complexas podem pesar centenas de toneladas. Transportá-los da fábrica para o local de funcionamento é por si só uma tarefa de engenharia complicada que acarreta custos proporcionais à sua massa.

A aplicação de técnicas de optimização durante a fase de projecto de um transformador é de grande utilidade, já que todos os esforços para diminuir a sua massa se irão reflectir numa redução de custos sempre desejável.

1.2. OBJECTIVOS

O objectivo principal desta dissertação é:

- **Desenvolver um sistema de cálculo que permita minimizar a massa do Grande Reforço dos transformadores SHELL, baseado em algoritmos de optimização e em equações analíticas que serão validadas pelo método dos elementos finitos.**

A estrutura do Grande Reforço (GR) é projectada de modo a garantir a integridade estrutural dos transformadores durante a ocorrência de um curto-circuito (CC). Pretende-se criar um sistema genérico que optimize GR's de qualquer dimensão. Isto implica desenvolver as seguintes acções:

1. **Criar um modelo paramétrico do GR em APDL (ANSYS Parametric Development Language). O modelo representará um GR genérico e irá permitir que se efectuem optimizações para qualquer conjunto de parâmetros pelo método dos elementos finitos (MEF).**

2. **Desenvolver um modelo analítico do GR que forneça resultados tão aproximados quanto possível dos obtidos pela análise de elementos finitos.**
3. **Criar as interfaces necessárias entre os algoritmos de optimização disponíveis no MATLAB e o programa de elementos finitos ANSYS que possibilitem optimizar o GR.**
4. **Aplicar os algoritmos genéticos (AG's) e os algoritmos baseados em gradientes (FMINCON) do MATLAB na optimização do GR. Adicionalmente desenvolver um algoritmo híbrido que permite obter resultados excelentes com menor tempo de cálculo.**
5. **Desenvolver uma interface gráfica para todo o sistema de cálculo.**
6. **Utilizar o sistema desenvolvido para optimizar três grandes reforços actualmente fabricados pela EFACEC.**

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos: “Introdução”, “Optimização Estrutural”, “Modelo de Elementos Finitos”, “Modelo Analítico”, “Interface GROPTI”, “Análise de Resultados” e “Conclusões”.

A “Introdução” apresenta os objectivos e motivações que conduziram à elaboração deste trabalho, bem como a organização da dissertação.

No capítulo “Optimização Estrutural”, descreve-se a formulação genérica de um problema de optimização, aplica-se essa formulação no problema do GR e explica-se o funcionamento dos algoritmos genéticos, dos algoritmos baseados em gradientes e do algoritmo híbrido desenvolvido.

O capítulo “Modelo de Elementos Finitos” apresenta o modelo parametrizado do GR no qual foi usada a linguagem *APLD* do ANSYS. Para um conjunto de valores dos parâmetros, o ficheiro criado gera um modelo de elementos finitos completo do GR correspondente. Também se descreve o funcionamento da interface entre os programas ANSYS e MATLAB.

O capítulo “Modelo Analítico” apresenta o modelo simplificado do GR que foi desenvolvido com base nas equações da teoria de vigas. A utilização deste modelo permite efectuar a optimização do GR sem o recurso ao ANSYS e conduz a tempos de cálculo muito reduzidos comparativamente ao modelo apresentado no capítulo anterior.

O capítulo “Interface GROPTI” apresenta a interface gráfica criada e explica o seu funcionamento.

Os resultados da aplicação do sistema desenvolvido na optimização dos GR’s que integram três transformadores *SHELL* existentes, designados transformador trifásico (TT), transformador trifásico entre fases (TE) e transformador monofásico (TM) são apresentados no capítulo “Resultados”.

Por fim no capítulo “Conclusões”, resume-se o que de mais importante se observou durante a elaboração deste trabalho e apresentam-se perspectivas de futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

OPTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Com a crescente globalização dos mercados e consequente aumento da competitividade, verifica-se que o cliente de hoje é cada vez mais exigente, esperando adquirir produtos de melhor qualidade ao mais baixo preço. Para uma empresa isso representa um imenso esforço organizacional e de engenharia.

As ferramentas de optimização podem contribuir de forma significativa para que os produtos desenvolvidos vão de encontro às expectativas dos clientes. Na fase de projecto podem ser usadas ferramentas de optimização estrutural que têm vindo a ser desenvolvidas nos últimos 50 anos e que constituem actualmente preciosos auxiliares no desempenho desta actividade.

Os métodos tradicionais de optimização por “*tentativa e erro*” podem conduzir a muito boas soluções mas têm o inconveniente de depender da experiência do projectista que resulta normalmente do facto de ter executado anteriormente um número razoável de projectos com características semelhantes. A utilização das metodologias tradicionais para o projecto de novas estruturas muitas vezes conduz a soluções menos óptimas e pode requerer tempos elevados de execução.

Os primeiros trabalhos analíticos sobre optimização estrutural foram publicados por Maxwell (1890) [1] e Mitchell (1904) [2]. Mas a optimização estrutural moderna teve início após a década de 50, onde ocorreram desenvolvimentos significativos em três domínios importantes:

- Os computadores digitais, que surgiram no início da década de 1950.
- Os métodos numéricos de programação matemática, desenvolvidos pela comunidade de investigação operacional.
- Os métodos numéricos de análise de estruturas, como o método dos elementos finitos, que permitiu aos engenheiros a análise de estruturas complexas.

O artigo de Schmit [3] publicado em 1960 é actualmente considerado um marco que separa os desenvolvimentos iniciais da optimização estrutural e a optimização estrutural moderna. Este artigo adquiriu uma importância única na altura da sua publicação porque, por um lado, introduziu a ideia brilhante de combinar a análise estrutural por elementos finitos com os métodos numéricos de programação matemática e, por outro lado, demonstrou a viabilidade deste processo na resolução de problemas reais. Esta combinação veio revolucionar a

metodologia do projecto permitindo realizar o dimensionamento automático de forma eficiente.

Nas décadas seguintes surgiu um grande interesse pela optimização estrutural na indústria aeronáutica e aeroespacial devido à necessidade de projectar estruturas leves. Os programas de exploração espacial mobilizaram recursos avultados para a investigação nesta área. Os progressos foram significativos e ocorreram ao nível da teoria da optimização, dos algoritmos numéricos de optimização, do método dos elementos finitos e do hardware e software em geral. Neste cenário de desenvolvimento, a utilização de optimização estrutural expandiu-se a um maior número de domínios, como a construção automóvel, a construção civil e a construção naval.

A resolução de problemas de programação linear teve grande importância na década de 1950. Os métodos de programação não linear aplicados a problemas contínuos conheceram um desenvolvimento substancial nas décadas de 1970 e 1980. De entre estes métodos destaca-se a programação quadrática sequencial pelo uso generalizado que tem tido até aos dias de hoje. No entanto, apesar do esforço de investigação concentrado nestes métodos concluiu-se que eram apenas eficientes e aplicáveis a um número limitado de problemas de optimização estrutural. O desenvolvimento de métodos com espectro de aplicação mais alargado tornava-se sem dúvida uma necessidade.

A partir da década de 80 houve um desenvolvimento substancial e entusiástico de métodos aplicáveis a problemas de optimização estrutural discretos e mistos. Em parte, este objectivo foi atingido pelas meta-heurísticas que foram desenvolvidas e aplicadas com sucesso a problemas de optimização combinatoria no âmbito da investigação operacional. O termo meta-heurísticas foi introduzido em 1986 por Glover [4] e serve para englobar um conjunto de técnicas, de entre as quais a mais conhecida são os algoritmos genéticos.

Num projecto de engenharia estrutural, usualmente a optimização procura obter a estrutura de menor massa que continue a desempenhar a função pretendida. A procura pela estrutura mais eficiente implica que se tenha de escolher uma entre várias soluções admissíveis, por isso é necessário criar um modelo matemático que classifique quantitativamente cada solução. Uma correcta formulação de um problema de optimização corresponde a realizar metade do esforço necessário para a obter a solução [5].

2.1. FORMULAÇÃO GENÉRICA DE UM PROBLEMA DE OPTIMIZAÇÃO

Os elementos de um problema de optimização são: **Variáveis de Projecto**, **Parâmetros de Projecto**, **Constrangimentos** e **Função Objectivo**.

A formulação de um problema de optimização envolve as seguintes fases:

- Identificação das variáveis de projecto.
- Identificação dos constrangimentos de projecto.
- Definição da função objectivo.

Durante o processo de optimização, os **parâmetros** de projecto são **constantes** que definem o problema que se pretende estudar. As **variáveis** de projecto são parâmetros de um tipo especial porque podem ser **alteradas** a cada iteração pelo algoritmo de optimização, assumindo valores que se encontram dentro de um domínio contínuo, discreto ou booleano. São normalmente associadas à dimensão, forma ou topologia da estrutura. Um conjunto de valores das variáveis define uma solução. Para que essa solução seja admissível todos os **constrangimentos** de projecto têm de ser satisfeitos. Os constrangimentos correspondem normalmente a impor que os limites admissíveis para as tensões ou os deslocamentos não são ultrapassados em determinados pontos da estrutura. Também podem ser impostos limites admissíveis para a carga crítica, para as frequências naturais ou para as deformações.

A **função objectivo** é a característica do sistema que se pretende optimizar. É comum considerar o peso da estrutura e também pretender obter o peso mínimo, mas outras características podem ser usadas, por exemplo o custo. Definindo as variáveis e constrangimentos, a minimização da função objectivo é frequentemente obtida com recurso a métodos numéricos aplicados iterativamente e que são controlados por um algoritmo de optimização. O algoritmo melhora a função objectivo, alterando as variáveis de projecto e certificando-se que os constrangimentos assumidos são verificados.

Formalmente o problema pode ser representado da seguinte forma, de acordo com [5]:

$$\text{Minimizar: } f(\mathbf{x}) \quad [2.1]$$

$$\text{Sujeito a: } g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad ; j = 1, \dots, m \quad [2.2]$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad ; k = 1, \dots, p \quad [2.3]$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad ; i = 1, \dots, n \quad [2.4]$$

Onde x é o vector das n variáveis de projecto, $f(x)$ é a função objectivo, $g_j(x)$ são os m constrangimentos de desigualdade, $h_k(x)$ são os p constrangimentos de igualdade, x_i^l e x_i^u são os limites inferior e superior das variáveis de projecto x_i respectivamente.

2.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OPTIMIZAÇÃO DO GR

2.2.1. ESTRUTURA ESTUDADA

O GR é um componente que integra os transformadores SHELL fabricados pela EFACEC e que contribui significativamente para o peso total da estrutura dos mesmos. Projectado para garantir a integridade estrutural dos transformadores durante a ocorrência de um CC, pode ser descrito como sendo um conjunto de quatro vigas em caixão que formam um rectângulo que envolve o núcleo do transformador. Na figura 2.1 está representado o tanque e o respectivo GR (delineado a vermelho) de um TM onde é montado o núcleo do transformador,

Durante o fenómeno de CC as forças internas transmitidas pelo núcleo (denominadas de forças de curto-circuito (FCC)) ao tanque aumentam significativamente o que torna o dimensionamento do GR crucial para a integridade estrutural do transformador e a segurança em redor do mesmo.

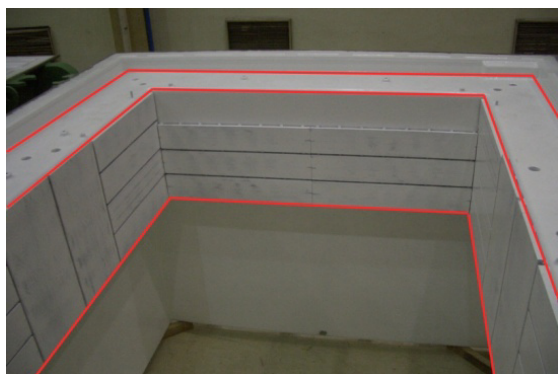


Fig. 2.1 - Tanque transformador monofásico

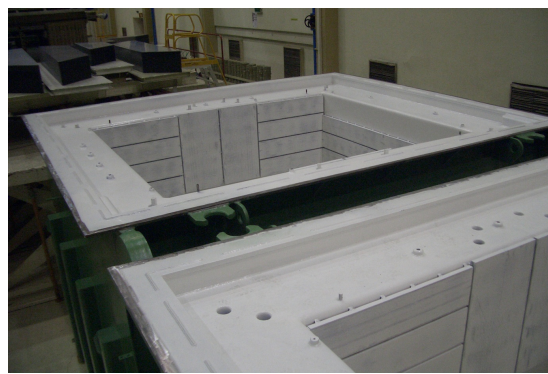


Fig. 2.2 - Vista geral

2.2.1.1. Parâmetros de projecto

O conjunto de dimensões e características que definem o GR foi dividido em dois grupos, os **parâmetros de projecto** e as **variáveis de projecto**. A figura 2.3 representa o esquema de um GR e os parâmetros que o definem. As secções transversais do GR são idênticas para cada conjunto de duas vigas paralelas, por isso o GR tem dois planos de simetria.

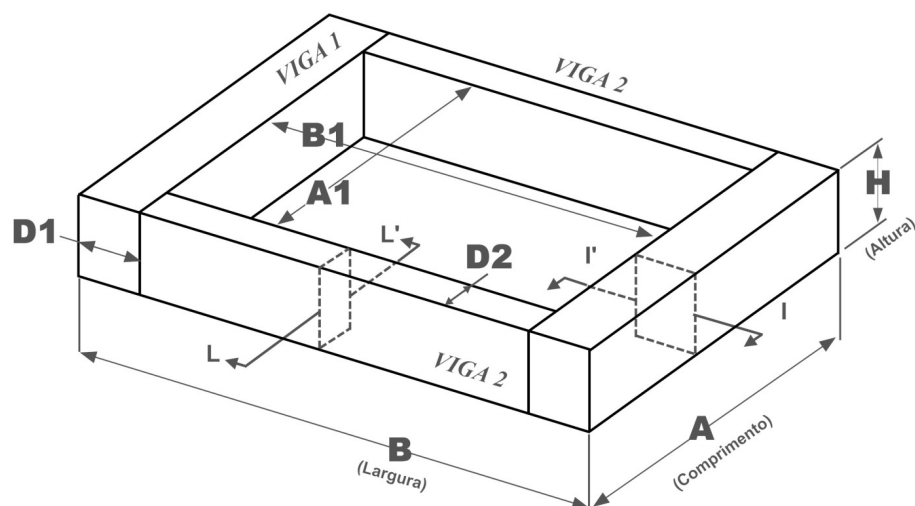


Fig. 2.3 - Esquema grande reforço

A FCC gerada pelo núcleo durante um CC também é constante durante o processo de optimização. Essa força é aplicada com igual intensidade nas duas faces indicadas da figura 2.4.

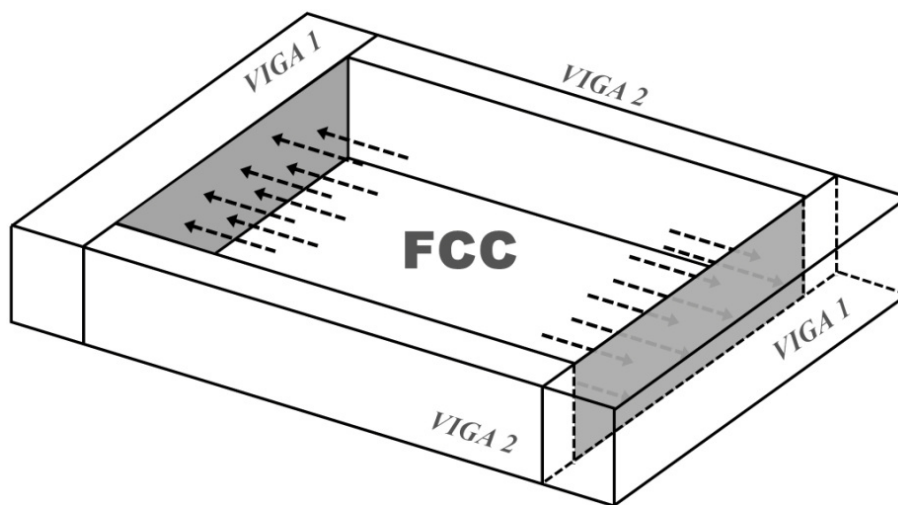


Fig. 2.4 - Força de curto-circuito

A face interna da VIGA 1 absorve grande parte do choque mecânico que ocorre durante o CC. Se não for correctamente dimensionada pode deformar-se em demasia e se tal ocorrer, os enrolamentos do transformador podem ficar permanentemente danificados. Por isso e para evitar que a chapa tenha uma espessura excessiva, cutelos são colocados transversalmente ao longo do eixo da VIGA 1 (figura 2.5). O número de cutelos é um parâmetro de projecto.

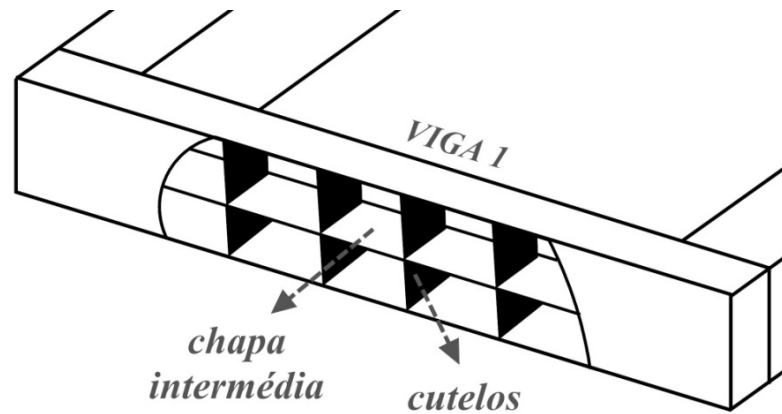


Fig. 2.5 - Cutelos VIGA 1

Resumidamente, os parâmetros que definem as dimensões globais do GR, o número de cutelos e a FCC são considerados **fixos** durante todo o processo de optimização. Na tabela 2.1 estão listados todos os parâmetros utilizados.

Tabela 2.1 - Parâmetros de projecto

Denominação	Descrição
H	Altura da VIGA 1 e VIGA 2
D1	Largura VIGA 1
D2	Largura VIGA 2
A	Comprimento externo GR
A1	Comprimento interno GR
B	Largura externa GR
B1	Largura interna GR
FCC	Força de curto-circuito
NC	Número de cutelos

2.2.1.2. Variáveis de projecto

As vigas do GR são constituídas por três placas, cada uma identificada com uma cor diferente na figura 2.6. As espessuras das seis placas são as **variáveis de projecto** que são escolhidas pelo algoritmo de optimização com o objectivo de diminuir o peso. Cada placa é identificada por um número, que corresponde ao número da variável usado pelo algoritmo de optimização, neste caso x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 e x_6 respectivamente. Na imagem pode ainda ver-se a posição relativa que cada uma das placas assume nas respectivas vigas.

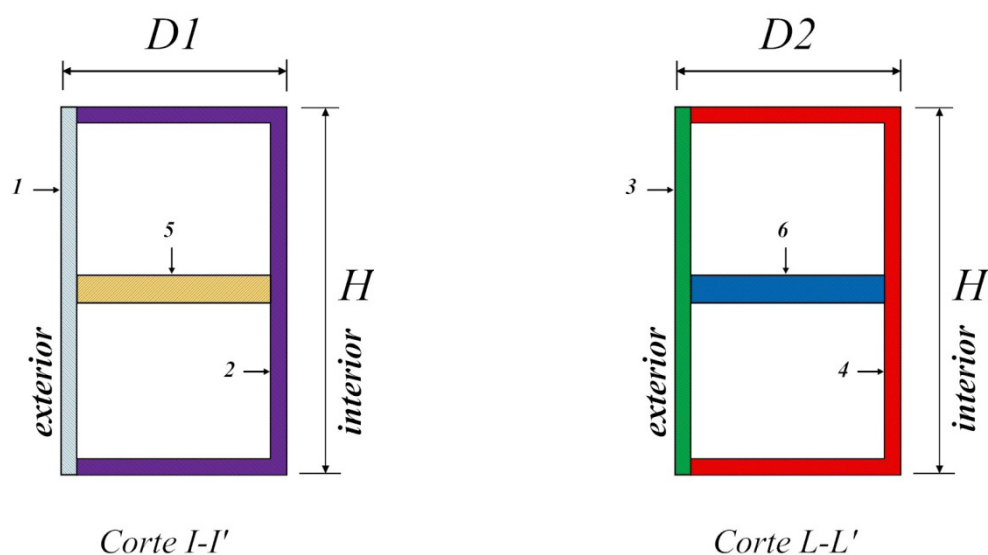


Fig. 2.6 - Cortes secção VIGA 1 e VIGA 2

Por razões construtivas o domínio das variáveis de projecto é discreto. Os valores das espessuras admissíveis que as placas podem assumir estão listados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Espessuras admissíveis

Placas 1 a 4								
Espessura [mm]	8	10	12	16	20	25	30	40
Placas 5 e 6								
Espessura [mm]	0	8	10	12	16	20	25	30

As placas 5 e 6 (chapas intermédias, figura 2.5) atravessam as vigas ao longo de todo o seu comprimento e têm como objectivo aumentar a rigidez da estrutura, permitindo assim que o deslocamento seja menor.

2.2.1.3. Constrangimentos

A simetria geométrica e de carregamentos existentes no problema proposto permite que apenas seja necessário avaliar os constrangimentos nas zonas indicadas na figura 2.7. No ponto central da VIGA 1 é avaliada a tensão e o deslocamento, no canto e na placa interior é avaliada a tensão.

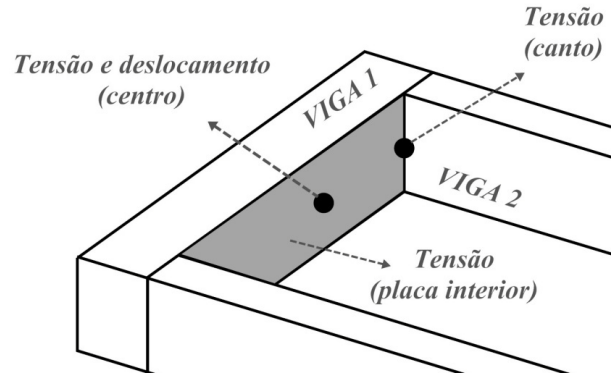


Fig. 2.7 - Zonas de avaliação dos constrangimentos

Durante o processo de otimização apenas o valor máximo entre a tensão no centro (σ_{centro}) e no canto (σ_{canto}) é comparado com o valor admissível para a tensão. Esta tensão é denominada de tensão “global”.

$$\sigma_{global} = \max(\sigma_{centro}, \sigma_{canto}) \quad [2.5]$$

Os valores admissíveis para os constrangimentos de tensão são indicados pelo utilizador dependendo do tipo de aço que se pretenda usar. Para uma solução ser admissível, as zonas indicadas não podem ultrapassar os valores especificados. Resumidamente, os valores admissíveis para os pontos avaliados são:

Tabela 2.3 - Valores admissíveis

Constrangimento	Global	Placa interior
Tensão	$\sigma_{global} \leq \sigma_{ruptura}$	$\sigma_{placa} \leq \sigma_{cedencia}$
Deslocamento	$\delta_{centro} \leq \delta_{admissivel}$	Não avaliado

Os vários constrangimentos do problema devem ser escalados, isto é, transformados de forma a assumir valores da mesma ordem de grandeza e escritos de acordo com a equação 2.2.

$$g_j(\mathbf{x}) = \frac{|\sigma| - \sigma_{admissivel}}{\sigma_{admissivel}} \quad [2.6]$$

$$g_j(\mathbf{x}) = \frac{|\delta| - \delta_{admissivel}}{\delta_{admissivel}} \quad [2.7]$$

Embora esta seja a formulação usada pelo algoritmo de otimização, é comum indicar os constrangimentos da seguinte forma:

$$\sigma \leq \sigma_{admissivel} \quad [2.8]$$

$$\delta \leq \delta_{admissivel} \quad [2.9]$$

2.2.2. FORÇA DE CURTO-CIRCUITO

Para entender melhor a origem da FCC e os fenómenos envolvidos durante um CC relembremos, com auxílio de um esquema, o funcionamento básico de um transformador.

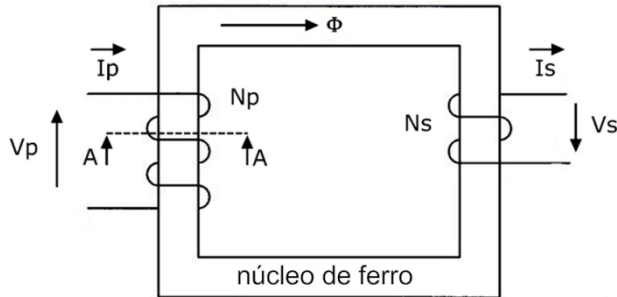


Fig. 2.8 - Esquema transformador

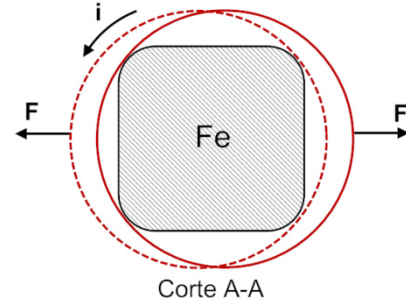


Fig. 2.9 - Corte núcleo de ferro

Um transformador simples é constituído por um núcleo central de ferro (figura 2.8) que contém tipicamente dois enrolamentos (primário e secundário). Quando criada uma diferença de potencial no enrolamento primário, uma corrente alterna (i_p) passa por este gerando um fluxo magnético (ϕ) no núcleo, que por indução produz uma corrente (i_s) no enrolamento secundário. A voltagem secundária é proporcional ao quociente entre o número de espiras do enrolamento primário e secundário, podendo ser maior ou menor consoante o tipo de transformador em questão (*step-up* ou *step-down* respectivamente). A direcção das forças que actuam nas espiras é radial relativamente ao eixo dos enrolamentos, tal como representado na figura 2.9. Estas forças exercem uma pressão nas paredes do GR.

Durante o funcionamento nominal de um transformador, a intensidade de corrente mantém-se relativamente constante, porém, durante o CC aumenta significativamente. Isto ocorre porque a impedância de curto-circuito (Z_{CC}) desce para valores tipicamente na ordem dos 5% dos da impedância nominal (Z_N). A intensidade de corrente de curto-circuito (i_{cc}) está relacionada com a corrente nominal (i_N) e as impedâncias pela seguinte equação:

$$i_{cc} = i_N \times \frac{Z_N}{Z_{cc}} \quad [2.10]$$

Por exemplo, quando a Z_{CC} é igual a Z_N , a i_{cc} é igual à i_N , logo estamos no regime de funcionamento nominal do transformador. No entanto, se a Z_{CC} descer para valores na ordem dos 5% da Z_N , a corrente aumenta 20 vezes relativamente ao seu valor nominal. Sabe-se que a F_{cc} está relacionada com a i_{cc} e com a permeabilidade do material (μ) pela seguinte equação:

$$F_{cc} = \mu \times i_{cc}^2 \quad [2.11]$$

Concluí-se então que durante o CC as pressões internas transmitidas pela parte activa ao tanque que o contém aumentam significativamente para valores tipicamente 400 vezes superiores aos nominais.

São admitidas algumas simplificações relativamente às características da FCC, assume-se que é estaticamente aplicada e que se distribui uniformemente por toda a face interna da VIGA 1. Na realidade não o é, mas para efeitos de optimização é razoável assumir estas hipóteses.

2.2.3. REPRESENTAÇÃO FORMAL DO PROBLEMA

Identificadas as **variáveis de projecto**, **constrangimentos** e **função objectivo**, resumidamente tem-se:

- **Variáveis de projecto:** Espessuras das placas que constituem as VIGAS 1 e 2.
- **Constrangimentos:** As tensões e o deslocamento nas zonas identificadas na secção 2.2.1.3 não poderão ultrapassar os valores admissíveis.
- **Função objectivo:** Massa do GR.

Formalmente o problema pode ser representado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar: } f_{massa}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \quad [2.12]$$

$$\text{Sujeito a: } \sigma_{global}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \leq \sigma_{ruptura} \quad [2.13]$$

$$\sigma_{placa}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \leq \sigma_{cendencia} \quad [2.14]$$

$$\delta_{centro}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \leq \delta_{admissivel} \quad [2.15]$$

Pretende-se minimizar f_{massa} sujeita a três constrangimentos de desigualdade, com seis variáveis de projecto, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 e x_6 , que correspondem às espessuras das placas 1,2,3,4,5 e 6 da figura 2.6 respectivamente. Estas são alteradas durante o processo de optimização pelos algoritmos de optimização e podem assumir os valores da tabela 2.2.

2.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZAÇÃO

2.3.1. ALGORITMOS GENÉTICOS

A aplicação dos (AG's) nesta dissertação é bastante objectiva, por isso irão ser abordados apenas os assuntos mais relevantes e que tenham utilidade para o funcionamento do sistema de cálculo criado.

John Holland da Universidade de Michigan desenvolveu conjuntamente com os seus alunos da área de genética e sistemas adaptativos um modelo computacional que se baseia na teoria da evolução de Darwin. Darwin afirma que a evolução das espécies ocorre por meio de um processo de selecção natural, ou seja, as características favoráveis à adaptação de um indivíduo ao meio tornam-se sucessivamente mais comuns com o passar das gerações e as características desfavoráveis tornam-se mais raras. Isto ocorre porque indivíduos com características vantajosas têm mais probabilidade de se reproduzirem com sucesso.

O objectivo de Holland era desenvolver um modelo computacional que reproduzisse os mecanismos mais importantes dos sistemas adaptativos naturais. Em 1975 Holland publicou o livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, no entanto foi apenas em 1989 que David Goldberg, um aluno de Holland que publicou o livro *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, obteve as primeiras aplicações com sucesso industrial [6]. Outras aplicações de AG's em optimização estrutural foram também apresentadas por Ricardo Amaral [7]. O AG apresentado por Goldberg é chamado de Algoritmo Genético Simples (AGS) e serve de base para os AG's modernos.

Analogamente ao que ocorre na natureza, nos AG's cada indivíduo é caracterizado por um conjunto de genes (cromossoma) que o torna único. Os cromossomas nos AG's resultam da codificação binária do vector das variáveis de projecto e contêm vários genes que podem tomar o valor 0 ou 1. Por aplicação dos operadores genéticos fundamentais (selecção, cruzamento e mutação) o algoritmo procura certificar-se que a solução mais eficiente (indivíduo mais apto) predomine no fim do processo iterativo de optimização.

O processo iterativo do AG é composto fundamentalmente pelas seguintes fases:

- Codificação e decodificação das variáveis do problema utilizando cromossomas.
- Avaliação da aptidão e atribuição do mérito a cada cromossoma.
- Aplicação dos operadores genéticos para gerar a próxima geração de indivíduos.

As seguintes secções explicam sucintamente cada uma das fases acima identificadas.

2.3.1.1. Codificação das Variáveis

Os AG's trabalham com uma codificação do vector das variáveis, que são transformadas num cromossoma contendo genes. No caso estudado, cada **GR é um indivíduo** e as **espessuras de cada placa as variáveis** do problema de optimização. O GR é composto por um vector de variáveis de projecto $x = (x_1, \dots, x_n)$, por exemplo:

Tabela 2.4 – Variáveis GR não codificadas

Grande Reforço (indivíduo)					
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
8 mm	12 mm	40 mm	30 mm	25 mm	20 mm

As variáveis são então codificadas num vector representado por $a = (a_1, \dots, a_k) \in B^k$, com $B = \{0,1\}$ e k número de genes. Quando se codificam n variáveis, cada uma delas tem k' genes, de modo a que $k = k' \times n$. Na tabela 2.5 temos as variáveis da tabela 2.4 codificadas.

Tabela 2.5 - Variáveis GR codificadas

Grande Reforço (indivíduo)					
Cromossoma					
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Gene 1	Gene 2	Gene 3	Gene 4	Gene 5	Gene 6
0 0 0	0 1 0	1 1 1	1 1 0	1 1 0	1 0 1

De acordo com Hajela (1992) [8] a representação de um número binário com m dígitos, de uma variável contínua, permite 2^m variações da variável a ser considerada. No GR temos oito valores possíveis para cada variável, logo para representar de forma binária cada variável x_i necessita-se de três dígitos, porque $2^3=8$.

A decodificação de cada segmento do cromossoma no respectivo valor da variável de projecto x_i é efectuada transformando os genes contidos no segmento num número inteiro positivo z_i por aplicação de ψ^i e em seguida, transformando z_i no valor da variável de projecto x_i , através de χ^i .

$$z_i = \left(\sum_{j=0}^{k'-1} a_i(k'-1-j) \cdot 2^j \right); \quad z_i = \psi^i(a_{i1}, \dots, a_{ik'}) : B^{k'} \longrightarrow Z_0^+ \quad [2.16]$$

$$x_i = u_i + \left(\frac{v_i - u_i}{2^{k'} - 1} \right) \times z_i; \quad z_i = \chi^i(z_i) : Z_0^+ \longrightarrow [u_i, v_i] \quad [2.17]$$

Na equação 2.17 os valores de u_i e v_i são os extremos do intervalo de variação da variável x_i . Na obtenção da transformação linear χ^i fez-se corresponder ao valor de u_i o segmento i com todos os genes iguais a zero e ao valor v_i o segmento i com todos os genes iguais a 1 [8].

2.3.1.2. Avaliação do Mérito

Os algoritmos genéticos avaliam funções não constrangidas. Porém na maior parte dos problemas de optimização estrutural existem constrangimentos. Neste tipo de problemas é comum que estes sejam a tensão e/ou deslocamentos e que a da função objectivo seja a massa, já que é esta característica da estrutura que se pretende minimizar. Para que os indivíduos mais aptos tenham maior probabilidade de serem seleccionados para cruzamento, é necessário atribuir uma classificação de mérito a cada um. Para tal é usado um esquema de penalização do seguinte tipo:

$$f = \text{massa} + \text{constante} \times g^*(x) \quad [2.18]$$

$g^*(x)$ é calculado a partir dos constrangimentos (equações 2.6 e 2.7) de forma a que $g^*(x)$ seja igual a $g(x)$ se este for positivo e $g^*(x)$ seja zero no caso de $g(x)$ ser menor ou igual a zero. Desta forma, caso os constrangimentos sejam violados o valor da função objectivo é penalizada. O resultado da função objectivo penalizada é uma medida da performance de cada cromossoma e permite calcular o respectivo mérito que desempenha um papel fundamental no processo de selecção [7].

A constante presente na equação 2.18 pode ser ajustada usando a seguinte metodologia:

Escolhe-se um valor suficientemente baixo para uma vez executado o algoritmo, obter um resultado final onde pelo menos um dos constrangimentos é violado. De seguida, aumenta-se sucessivamente a constante até que os valores dos constrangimentos sejam todos inferiores aos limites impostos.

2.3.1.3. Operadores Genéticos Fundamentais

SELECÇÃO

Este operador tem como objectivo permitir que boa informação genética presente nos cromossomas com aptidões favoráveis passe para a geração seguinte. Baseia-se no princípio da “sobrevivência do mais apto” [9]. Os tipos de selecção mais comuns são: *Roulette*, *Tournament* e *Stochastic Uniform*. Uma explicação mais detalhada de cada um é efectuada de seguida.

- *Roulette – Método da Roleta*

O método da roleta também conhecido pelo método de selecção proporcional é um dos mais utilizados. Neste método os indivíduos têm uma probabilidade de selecção proporcional ao seu mérito, ou seja, os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem seleccionados para cruzamento. A seguinte figura ilustra este método.

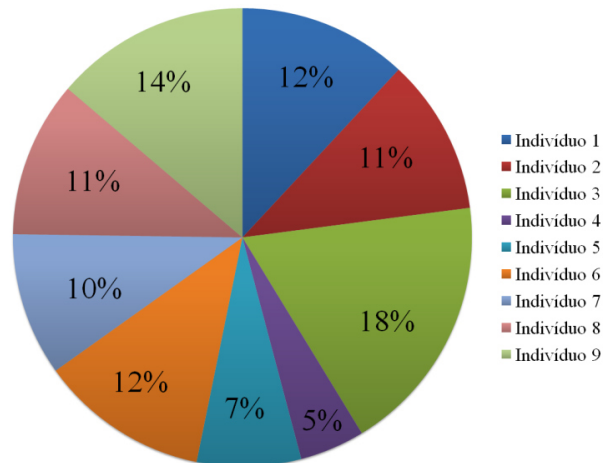


Fig. 2.10 – Método da Roleta

Cada fatia que o indivíduo ocupa representa a probabilidade de o mesmo ser seleccionado. Neste exemplo, para escolher seis elementos dos nove disponíveis, realizam-se seis lançamentos sobre a roleta da figura 2.10.

Esta técnica pode fazer que um grande número de cromossomas favoráveis cruzem entre si, pelo que faz diminuir a diversidade genética da população, que por sua vez pode conduzir a uma convergência prematura do algoritmo. As técnicas como escalas de mérito apresentadas na secção 2.3.1.2 minimizam este problema.

- *Torneio*

O conceito por trás deste método é bastante simples. Escolhem-se aleatoriamente N ($N \geq 2$) indivíduos da população e realiza-se um torneio entre eles. Os indivíduos com melhor aptidão vencem o torneio e são escolhidos para reprodução. Este método apresenta várias vantagens, entre elas:

- Não há convergência prematura do algoritmo, desde que a sua dimensão seja pequena.
- Pode lidar com funções objectivo que tenham valores negativos.
- Não requer esforço computacional extra.

- *Stochastic Uniform*

Neste método é criada uma linha de comprimento igual à unidade onde cada elemento é disposto da esquerda para a direita por ordem decrescente de probabilidade. O tamanho que cada um ocupa sobre a recta é proporcional ao seu mérito. A título de exemplo, com uma população de seis elementos (identificados com cores diferentes na figura 2.11), para escolher 4 indivíduos, geram-se quatro números com base na seguinte equação:

$$p_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \times i \quad [2.19]$$

Onde p_i representam pontos da recta. Se esses pontos pertencerem ao intervalo de recta que o indivíduo ocupa, o elemento é escolhido. A figura 2.11 ilustra este processo.

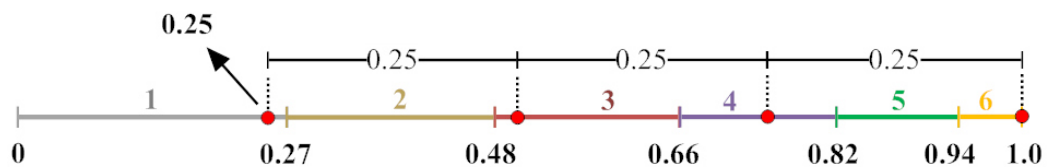


Fig. 2.11 – Método Stochastic Uniform

Os pontos p_i para $N=4$ estão contidos nas secções de recta que pertencem aos elementos 1,3,4 e 6 respectivamente. Esses indivíduos são então escolhidos. Contrariamente ao método da roleta, este método permite manter uma maior diversidade genética, já que nem sempre os indivíduos com melhor aptidão são seleccionados.

CRUZAMENTO

Este operador permite controlar de que forma se cruza a informação genética de dois indivíduos. Segmentos de cromossomas dos progenitores são escolhidos ao acaso e a informação contida nesses segmentos é trocada entre os dois cromossomas. Existem vários métodos para se escolher os segmentos de cromossoma, os mais comuns são o *One Point* e o *Two Point*.

Progenitor 1	001	101	111	010	000	110
Progenitor 2	111	110	000	100	100	010

Fig. 2.12 - Amostra de cromossomas

A figura 2.12 representa dois indivíduos e os seus respectivos cromossomas. No método *One Point* é seleccionado apenas um segmento de cada cromossoma a partir de uma posição aleatória. A figura 2.13 ilustra este processo.

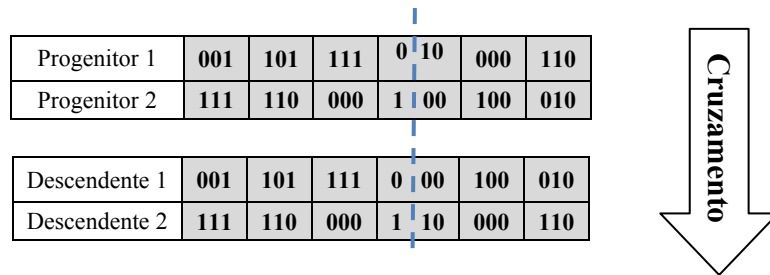


Fig. 2.13 – Cruzamento “one point”

Como se pode verificar, à direita do tracejado azul, os progenitores trocam metade dos genes que possuem. O método *Two Point* funciona da seguinte forma.

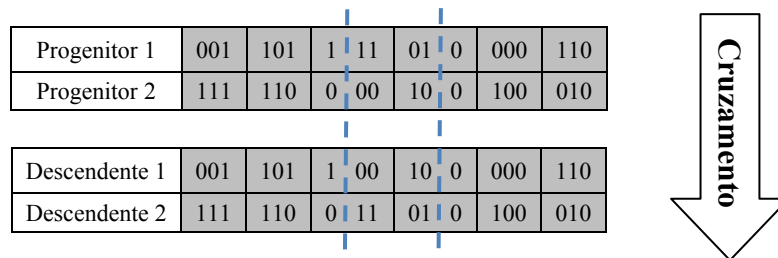


Fig. 2.14 - Cruzamento “two Point”

Trocam-se menos genes que no processo anterior, apenas os genes da secção central foram permutados, o que pode ser vantajoso. Se existirem genes favoráveis nas extremidades estes não são perdidos para as gerações seguintes.

MUTAÇÃO

O operador cruzamento gera novos indivíduos, mas por si só não é suficiente para garantir uma boa diversidade genética. O operador de mutação é aplicado a todos os indivíduos antes de integrarem uma nova geração, alterando arbitrariamente um ou mais genes dos seus cromossomas. É desejável que a sua probabilidade de actuação seja baixa, já que se a mutação ocorrer com frequência o AG não converge para zonas óptimas do domínio [9]. No entanto, quando usado correctamente permite efectuar uma exploração mais alargada do mesmo. As seguintes figuras ilustram este processo.

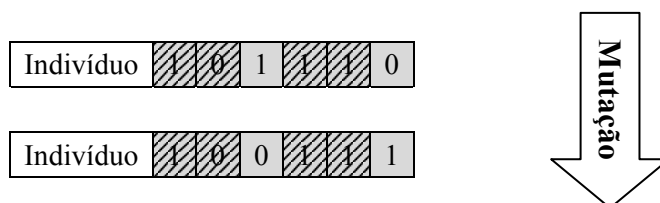


Fig. 2.15 - Cromossoma depois da mutação

Na mutação simples, apenas um gene aleatório por cromossoma é alterado.

2.3.2. ALGORITMO BASEADO NO GRADIENTE

Os métodos de optimização baseados em gradientes podem ser classificados em dois grandes grupos:

- Métodos indirectos, caracterizados pela aplicação de técnicas de minimização analíticas que, em geral, envolvem a resolução de um sistema de equações cujas soluções satisfazem as condições de optimalidade.
- Métodos directos, começam com uma solução que representa uma estimativa inicial do ponto óptimo e por meio de um processo iterativo melhora as soluções subsequentes até que as condições de optimalidade sejam satisfeitas.

Na maioria dos problemas de optimização em engenharia a aplicação de um método indirecto não é viável pois a complexidade de um sistema de equações deste tipo pode tornar a sua resolução morosa e por vezes intratável [10]. Os métodos directos ganham particular importância se parte ou todas as funções que caracterizam o problema de optimização forem não lineares.

O problema de optimização do GR é do tipo *constrangido não linear*. O MATLAB possui vários algoritmos baseados em gradientes que minimizam funções constrangidas. Estes englobam-se numa categoria de algoritmos do MATLAB designada de FMINCON (**F**ind **M**inimum **C**ONstraint). O trabalho desenvolvido usa o algoritmo FMINCON - Active Set, que é muito semelhante ao método numérico de *Programação Quadrática Sequencial (PQS)*. Neste as condições necessárias para a existência de mínimo local são habitualmente conhecidas como condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Estas condições são usadas para verificar a possibilidade de optimalidade num dado ponto e determinar os pontos candidatos a mínimos locais [10].

Os algoritmos baseados no gradiente só são aplicáveis se forem satisfeitos os seguintes requisitos:

- Espaço de projecto convexo, fechado e limitado.
- Continuidade das funções objectivo e dos constrangimentos.
- Diferenciabilidade das funções objectivo e dos constrangimentos.

A aplicabilidade deste tipo de algoritmos no problema do GR é por isso limitada, pois o domínio das variáveis de projecto (tabela 2.2) é discreto. No entanto, pode ter grande utilidade se usado conjuntamente com algoritmos genéticos.

2.3.3. ALGORITMO HÍBRIDO

O algoritmo híbrido desenvolvido combina a velocidade de cálculo dos algoritmos baseados no gradiente com a vantagem do AG poder ser usado em problemas cujo domínio é discreto. A optimização do GR é feita em duas fases:

Primeiramente é aplicado o algoritmo *FMINCON – Active Set*, que determina os valores óptimos das espessuras das placas do GR num domínio que é contínuo dentro do intervalo de valores especificado na tabela 2.2. Uma solução possível obtida por este é do tipo:

Tabela 2.6 - Solução *FMINCON – Active Set*

Grande Reforço					
$x_1 [mm]$	$x_2 [mm]$	$x_3 [mm]$	$x_4 [mm]$	$x_5 [mm]$	$x_6 [mm]$
12,13	19,44	20,74	8,34	8,21	13,76

As espessuras obtidas nesta primeira fase não têm qualquer utilidade prática. Porém é possível pela aplicação do AG encontrar uma solução aproximada desta, mas que pertença ao domínio discreto enunciado. Para isso configura-se o AG de modo que cada variável de projecto possua um domínio de valores admissíveis próprio. Esse domínio é composto por dois valores que resultam do arredondamento da solução calculada pelo *FMINCON – Active Set* para valores superiores e inferiores da tabela 2.2. Por exemplo:

Tabela 2.7 - Valores admissíveis AG - Híbrido

Grande Reforço					
$x_1 [mm]$	$x_2 [mm]$	$x_3 [mm]$	$x_4 [mm]$	$x_5 [mm]$	$x_6 [mm]$
16	20	25	10	10	16
12,13	19,44	20,74	8,34	8,21	13,76
12	16	20	8	8	12

Neste caso, cada placa passa a poder assumir os valores a verde da tabela 2.7. O AG continua a procurar a melhor solução para seis placas mas no entanto o cromossoma resultante da codificação das variáveis tem seis dígitos em vez dos dezoito que tinha no caso do AG descrito inicialmente, pois cada variável necessita apenas de um bit para representar a alternativa entre o valor superior e o valor inferior. Uma solução final para o exemplo proposto poderia ser:

Tabela 2.8 - Solução final algoritmo híbrido

Grande Reforço					
$x_1 [mm]$	$x_2 [mm]$	$x_3 [mm]$	$x_4 [mm]$	$x_5 [mm]$	$x_6 [mm]$
12	16	20	10	8	16

Este algoritmo apresenta uma melhoria significativa no tempo de processamento em relação ao AG inicial, porque cada placa passa a ter apenas dois valores admissíveis e o número de GR's diferentes possíveis é muitíssimo menor. Por isso não é necessário iniciar o AG com uma população muito vasta e consequentemente o número de gerações pode ser muito inferior.

Capítulo 3

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Este modelo utiliza o método dos elementos finitos e o programa ANSYS para avaliar os deslocamentos, as tensões e a massa necessários para efectuar a optimização do GR. É apresentado um sistema capaz de realizar a optimização do GR que usa os algoritmos de optimização do MATLAB e uma interface entre os dois programas. Os resultados obtidos permitem validar o modelo analítico que será apresentado no capítulo seguinte.

3.1. INTERFACE ANSYS-MATLAB

Durante o processo de optimização o MATLAB escolhe as espessuras das variáveis de projecto, enquanto o ANSYS avalia as tensões, o deslocamento e a massa do GR. Esta forma única de trabalhar apresenta grandes vantagens, pois permite utilizar os variados algoritmos de optimização presentes no software MATLAB conjuntamente com o ANSYS que é reconhecido pela sua excelente qualidade de análise e vasta biblioteca de elementos finitos.

Para que o sistema de cálculo faça a ligação entre os dois programas é necessário recorrer à capacidade que o ANSYS tem de funcionar em modo *batch*.

Este modo de funcionamento do ANSYS permite efectuar análises sem que seja necessário activar a sua interface gráfica. Por isso, é necessário que todos os comandos de modelação e análise sejam introduzidos num ficheiro de *input* escrito em linguagem paramétrica do ANSYS (APDL). Este tipo de linguagem permite usar comandos de repetição ou ciclo como o *DO* e *IF*. Esta capacidade torna a análise em modo *batch* extremamente poderosa. [11]

A troca de informação entre os programas ocorre em várias fases do processo, a seguinte secção explica resumidamente a sequência cronológica destas.

3.1.1. DIAGRAMA DE PROCESSO E SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES

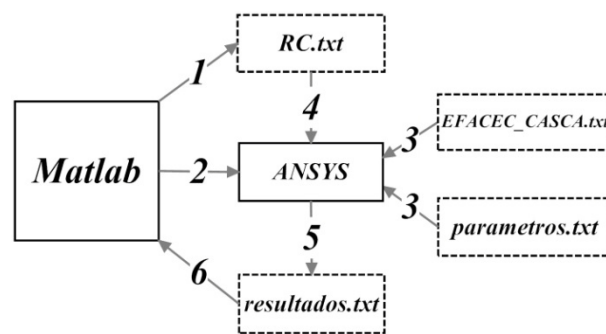


Fig. 3.1 - Sequência de processos e operações

A sequência cronológica de operações segue a ordem crescente dos números representados na figura 3.1. As fases são:

1. Após se iniciar o programa de otimização, o algoritmo atribui valores às variáveis de projecto. Estes valores são guardados no ficheiro “RC.txt”.
2. O MATLAB envia um comando para executar o ANSYS em modo *batch*.
3. Com recurso ao ficheiro APDL “EFACEC_CASCA.txt” é gerado o modelo de elementos finitos do GR com os parâmetros desejados. Estes são lidos do ficheiro “parametros.txt”.
4. As espessuras geradas pelo algoritmo do MATLAB são atribuídas às respectivas placas no modelo gerado.
5. Terminada a análise, o ANSYS exporta para o ficheiro “resultados.txt” os resultados da massa, das tensões e do deslocamento.
6. O algoritmo de otimização lê esses resultados e determina o próximo conjunto de valores das variáveis a experimentar, reiniciando o processo a partir da fase 1. Termina quando atingir o valor óptimo pretendido.

3.2. MODELO DO GR PARAMETRIZADO EM APDL

O sistema criado é capaz de otimizar o GR com qualquer conjunto de parâmetros. Esta flexibilidade é possível graças ao ficheiro APDL que contém todos os comandos necessários para efectuar a modelação e a análise pelo MEF. O ficheiro permite de forma expedita:

1. Alterar os parâmetros que definem o GR.
2. Controlar a intensidade do carregamento aplicado.

3. Ajustar o tamanho dos elementos que compõem a malha de elementos finitos.
4. Escolher o tipo de análise que se pretende efectuar.

Outra vantagem inerente a gerar o GR deste modo é a facilidade com que se podem corrigir eventuais erros de modelação, bastando para isso corrigir a linha de código correspondente.

3.2.1. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é um método numérico em que o domínio do problema é dividido em vários sub domínios (elementos) interconectados entre si em pontos denominados de nós que formam uma malha. Em cada elemento as equações que regem o fenómeno são aproximadas usando um método variacional. A razão principal para procurar aproximar uma solução num conjunto de sub domínios reside no facto de ser mais fácil representar uma função complicada como uma composição de funções polinomiais simples [10]. Podem-se aproximar essas funções com um erro tão pequeno quanto se queira, bastando para isso aumentar o número de elementos. Ou seja, quantos mais elementos se usarem para modelar a malha de elementos finitos, mais precisa será a solução. Dependendo da geometria e natureza do problema, o domínio de interesse pode ser discretizado usando elementos unidimensionais, de área ou de volume. [11]

No problema estudado usa-se o elemento *shell181*, que é recomendado pelo ANSYS para efectuar análise a estruturas constituídas por placas [12]. Este é um elemento casca para modelar estruturas tridimensionais, de espessura t , com quatro nós (I,J,K,L marcados a vermelho na figura 3.2) e com seis graus de liberdade por nó (translação e rotação em X,Y e Z).

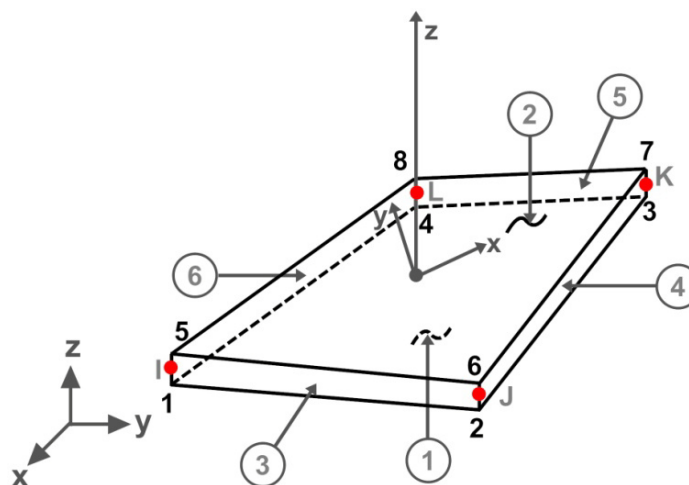


Fig. 3.2 - Elemento shell181

Em cada nó as tensões e deslocamentos são determinados em duas zonas distintas, que correspondem às faces 1 e 2 da figura 3.2. Por exemplo, no nó J a tensão é calculada nos pontos 6 e 2.

A geometria do GR é relativamente simples, não apresenta descontinuidades nem mudanças abruptas de forma, por isso é possível aplicar uma malha cujos nós estejam todos à mesma distância ou seja é fácil criar uma malha em que o tamanho dos elementos é aproximadamente constante em toda a estrutura.

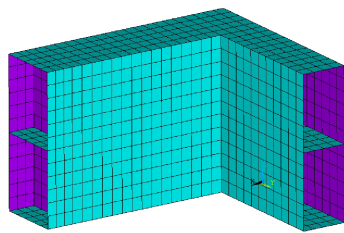


Fig. 3.3 - GR - malha grosseira

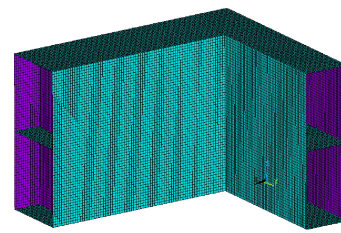


Fig. 3.4 - GR - malha fina

O tamanho do elemento tem influência directa na convergência da solução e no tempo de cálculo. Embora um grande número de elementos (figura 3.4) signifique uma maior precisão nos cálculos, se estes forem extremamente pequenos o tempo de processamento aumenta exponencialmente, sem que isso garanta maior qualidade da solução obtida.

Cabe ao utilizado encontrar o ponto de equilíbrio que produza resultados de qualidade num tempo de processamento aceitável.

3.2.2. GEOMETRIA

Todas as dimensões que definem o GR podem ser alteradas. A modelação paramétrica permite criar modelos tridimensionais do mesmo sem qualquer restrição para os valores dos parâmetros (excepto o número de cutelos, ver secção 3.2.2.2). Seguem-se alguns exemplos.

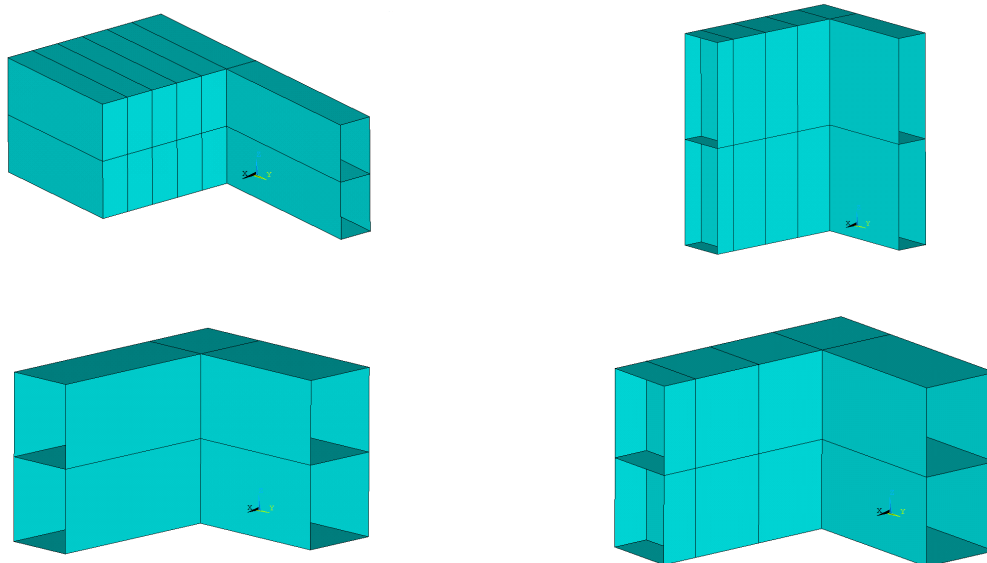


Fig. 3.5 - GR's correspondentes a valores diferentes dos parâmetros

3.2.2.1. Simetria

O problema de optimização do GR apresenta simetria geométrica, de material, carregamentos e de constrangimentos em dois planos. Por isso é vantajoso modelar apenas um quarto da estrutura. Para simular a estrutura completa é necessário aplicar condições fronteiras de simetria nas extremidades das VIGAS 1 e 2 do modelo criado (figura 3.6).

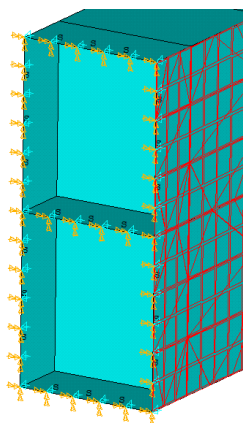


Fig. 3.6 - Constrangimento de simetria VIGA 1

Analisar o GR desta forma permite poupar recursos computacionais e diminuir o tempo de cálculo.

3.2.2.2. Cutelos

Estes elementos estruturais têm como objectivo reforçar a face interna da VIGA 1. O parâmetro que controla a quantidade de cutelos é *NC*. Estes são dispostos ao longo do eixo da

VIGA 1 e distanciados uns dos outros sempre pela mesma medida. Um número ímpar de NC corresponde a ter um cutelo no centro da VIGA 1, enquanto um número par deixa o centro da viga sem cutelo. Nas imagens que se seguem estão representados vários GR's com diferentes valores deste parâmetro.

Os cutelos de canto são sempre gerados, não podem ser retirados e não estão contabilizados no parâmetro NC .

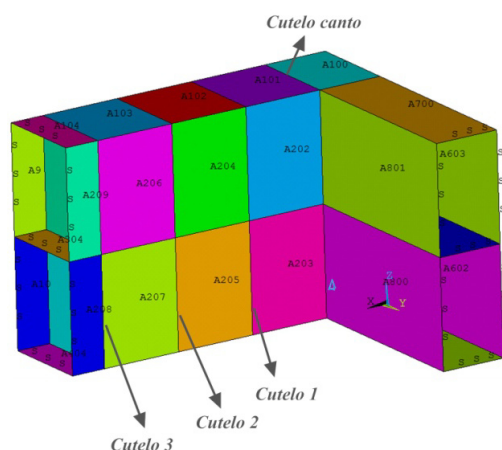


Fig. 3.7 - GR com seis cutelos ($NC=6$)

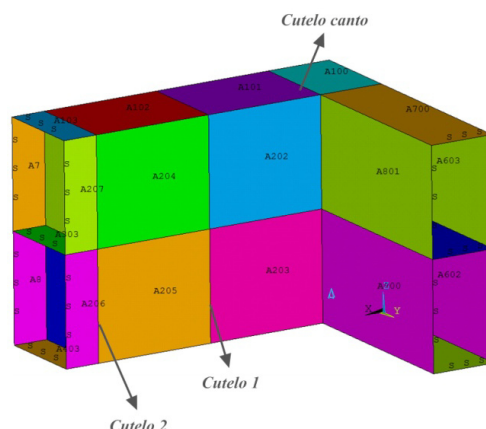


Fig. 3.8 - GR com quatro cutelos ($NC=4$)

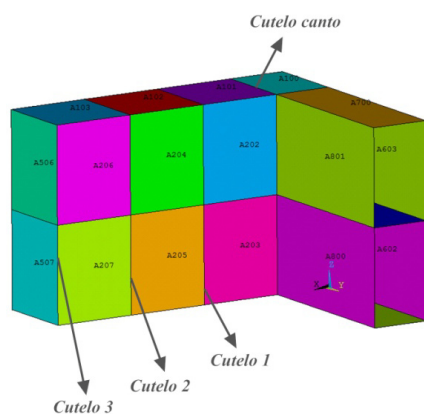


Fig. 3.9 - GR com cinco cutelos ($NC=5$)

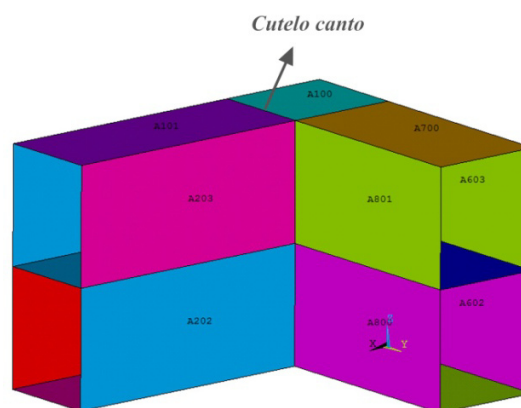


Fig. 3.10 - GR sem cutelos ($NC=0$)

O ficheiro APDL criado permite gerar GR's com um mínimo de zero e máximo de vinte cutelos.

3.2.3. CARREGAMENTOS

A FCC transmitida pelo núcleo do transformador ao GR é convertida numa pressão estaticamente aplicada e que se distribui uniformemente por toda a face interna da VIGA 1.

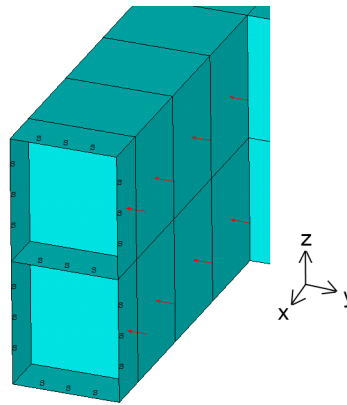


Fig. 3.11 - Pressão na face interna da VIGA 1

Esta tem a direcção normal às placas e sentido do eixo y (figura 3.11). A expressão que a define é:

$$P_{cc} = \frac{FCC}{H \times AI} \quad [2.20]$$

3.3. AVALIAÇÃO DOS CONSTRANGIMENTOS

Em todos os pontos indicados na secção 2.2.1.3 o *ANSYS* avalia a tensão equivalente de Von Mises. No ponto central da VIGA 1 também é calculado o deslocamento segundo o eixo y.

A tensão na placa interior é avaliada em pontos diferentes consoante o número de cutelos. Se *NC* for ímpar, um dos cutelos gerados ocupa exactamente o centro da VIGA 1, essa zona fica reforçada, logo a tensão diminui. O ponto de maior tensão na placa interior situa-se então entre o cutelo central e o cutelo imediatamente a seguir. A figura 3.12 ilustra esta situação.

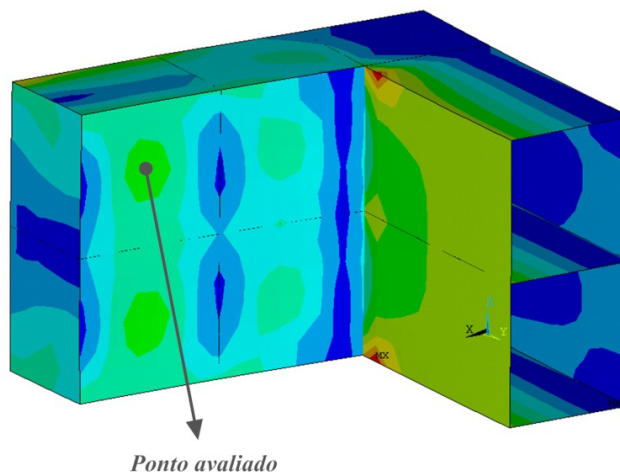


Fig. 3.12 - Ponto de avaliação da tensão na placa interior para NC ímpar

Quando NC é par ou zero, nenhum dos cutelos gerados ocupa o centro da VIGA 1, por isso essa zona fica sujeita a uma tensão maior relativamente à zona do exemplo anterior (figura 3.13).

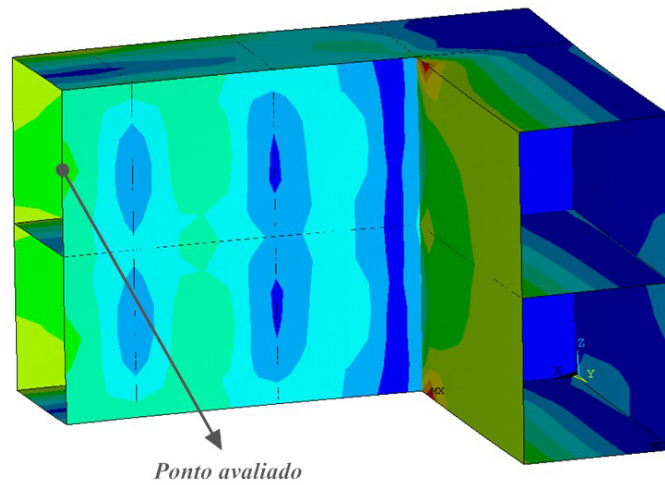


Fig. 3.13 - Ponto de avaliação da tensão na placa interior para NC par ou zero

As tensões e o deslocamento avaliados no centro e canto da viga são avaliados sempre nos mesmos pontos independentemente do número de cutelos usados (figura 3.14).

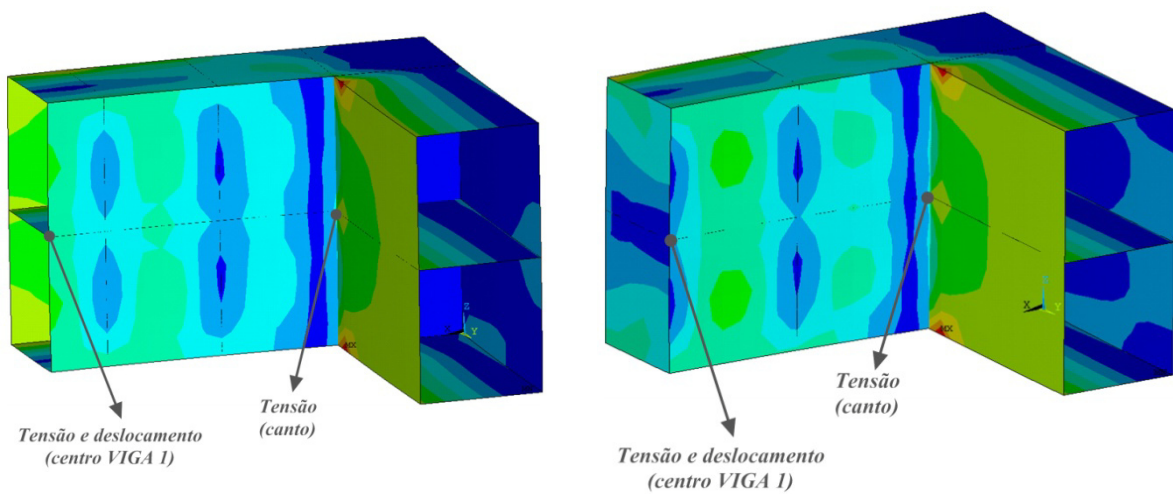


Fig. 3.14 - Tensões e deslocamento centro e canto VIGA 1

Capítulo 4

MODELO ANALÍTICO

Pretende-se neste capítulo desenvolver um conjunto de equações analíticas que permitam calcular as tensões, o deslocamento e a massa de um GR em função dos parâmetros que definem a geometria e os valores das variáveis de projecto. A utilização do modelo analítico constituído por estas equações permite, juntamente com os algoritmos de optimização descritos anteriormente, realizar a optimização de um GR sem recorrer ao programa ANSYS com vantagens consideráveis, como seja o tempo de cálculo muito reduzido.

Estas equações são calculadas no MATLAB e por isso toda a optimização é executada neste programa. O conjunto de equações usadas neste modelo divide-se em dois grupos que calculam:

1. Tensões e deslocamento

As equações que calculam os constrangimentos de tensão no centro e no canto da VIGA 1 são fornecidas pela EFACEC. A estas foram adicionadas a equações do livro “*Roark’s Formulas for Stress and Strain*”, que calculam a tensão e o deslocamento (apenas em condições muito particulares, ver secção 4.1.1.1) no centro da placa interior.

2. Momento de inércia, área e massa das vigas

As variáveis de projecto são as indicadas na figura 2.3. Contudo as expressões que calculam as tensões e o deslocamento estão formuladas em função de parâmetros que dependem destas variáveis, nomeadamente o momento de inércia (I), a área (A_v) e o módulo resistente (Z). Por isso é necessário formular expressões desses parâmetros em função das espessuras das placas. Estes parâmetros estão representados na figura 4.1. Também é adicionada uma equação que permite calcular a massa em função das espessuras das chapas. As equações são apresentadas na secção 4.1.

4.1. EQUAÇÕES DO MODELO ANALÍTICO

Num teste preliminar efectuado às equações fornecidas pela empresa EFACEC para o cálculo do deslocamento no centro da VIGA 1, constatou-se que elas não calculavam as componentes do deslocamento provocadas pelo esforço transversal na VIGA 1 e pelo alongamento da VIGA 2. Na secção seguinte apresenta-se a dedução das componentes do deslocamento em falta.

4.1.1. EQUAÇÕES BASEADAS NA TEORIA DE VIGAS

Os resultados obtidos por estas equações correspondem a considerar quatro vigas de comprimento igual aos eixos das VIGAS 1 e 2, que definem o contorno de um rectângulo de dimensões $a \times b$. A estrutura e o carregamento têm dois eixos de simetria, assinalados na figura 4.1, por isso o ponto p_C não sofre deslocamentos verticais. Pretende-se determinar o deslocamento vertical do ponto p_A pois esse é um dos critérios de dimensionamento.

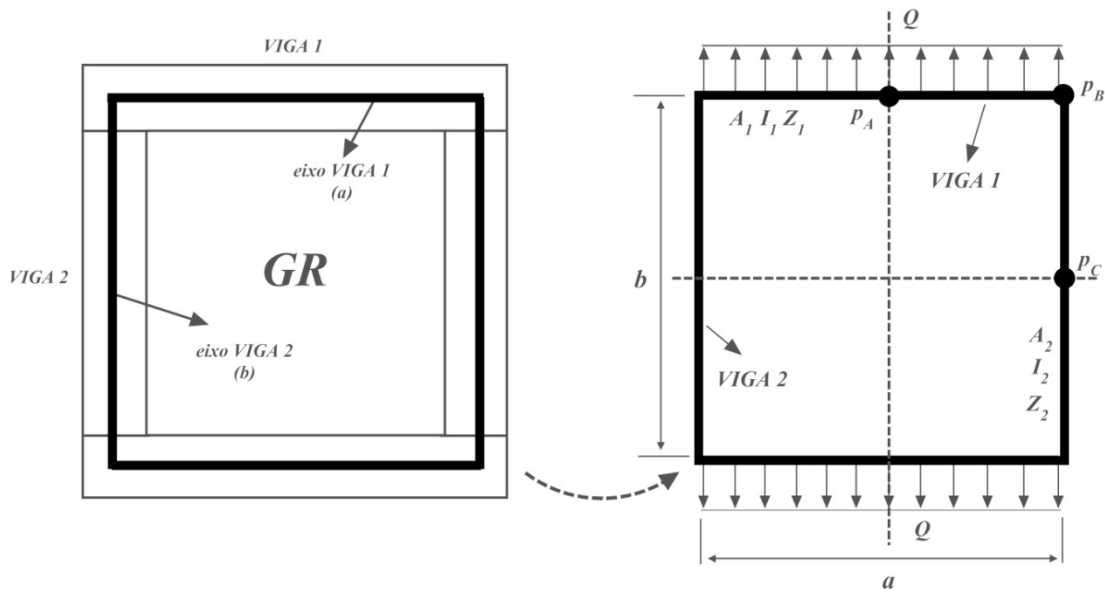


Fig. 4.1 – Modelo simplificado do GR

A simetria permite que se estude apenas $\frac{1}{4}$ da estrutura com as condições fronteira indicadas na figura 4.2.

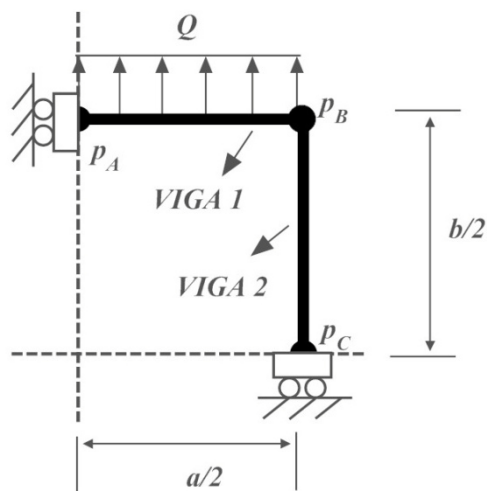


Fig. 4.2 - Condições fronteira de simetria - GR

Pode usar-se o *Teorema de Castigliano* para determinar o deslocamento vertical do ponto p_A . Como nesse ponto não existe nenhuma carga concentrada vertical, é necessário aplicar uma carga unitária e determinar os esforços internos nas duas vigas para os dois casos indicados na figura 4.3.

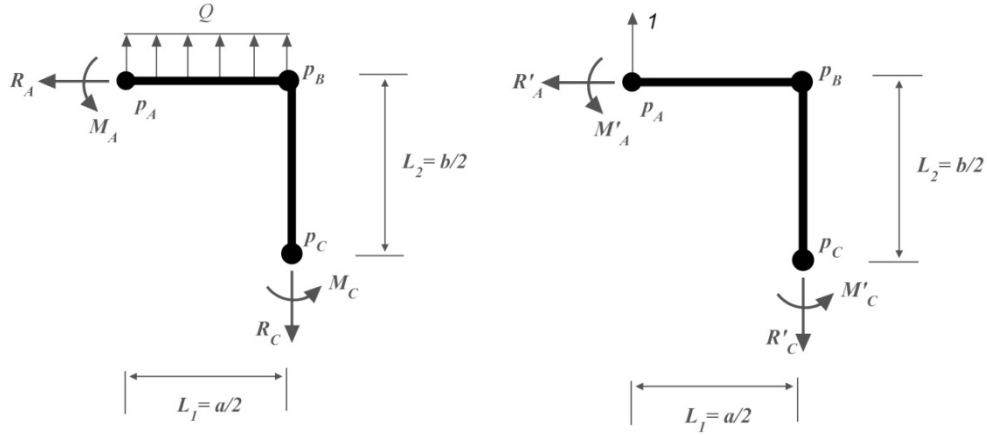


Fig. 4.3 - Carregamentos Teorema Castigliano

Aplicando equações de equilíbrio obtemos:

$$\begin{cases} -R_A = 0 \\ QL_1 - R_C = 0 \\ M_A + 0,5QL_1^2 + M_C - R_C L_1 = 0 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} R_A = 0 \\ R_C = QL_1 \end{cases} \quad [3.1]$$

$$\begin{cases} -R'_A = 0 \\ 1 - R'_C = 0 \\ M'_A + M'_C - R'_C L_1 = 0 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} R'_A = 0 \\ R'_C = 1 \end{cases} \quad [3.2]$$

Contudo não é possível calcular directamente os restantes momentos porque os dois problemas são indeterminados. Para conseguir uma equação suplementar, liberta-se a rotação no apoio C .

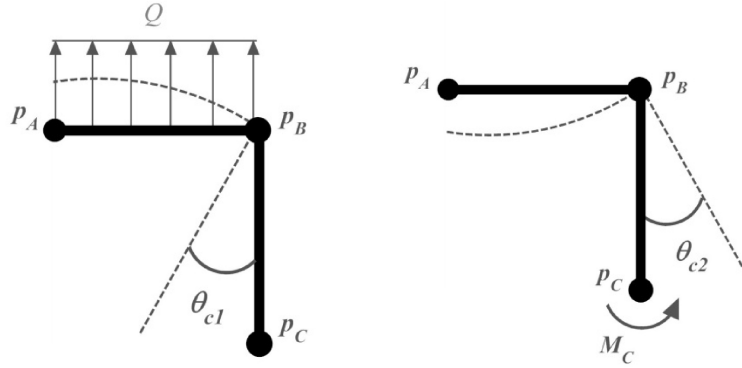


Fig. 4.4 - Rotação ponto C – carga distribuída

Recorrendo às tabelas das deformadas, calcula-se M_C .

$$\theta_{c1} = \frac{Q(2L_1)^3}{24EI_1} \longrightarrow \theta_{c1} = \theta_{c2} \Rightarrow M_C = \frac{QL_1^3 I_2}{3(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \quad [3.3]$$

$$\theta_{c2} = \frac{M_C L_1}{EI_1} + \frac{M_C L_2}{EI_2}$$

Substituindo M_C no sistema de equações 3.1 obtém-se M_A .

$$M_A = \frac{QL_1^2}{2} - \frac{QL_1^3 I_2}{3(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \quad [3.4]$$

Nestas expressões E representa o módulo de elasticidade e I_1, I_2 respectivamente os momentos de inércia das vigas AB e BC . De forma análoga determina-se em seguida M'_A e M'_C .

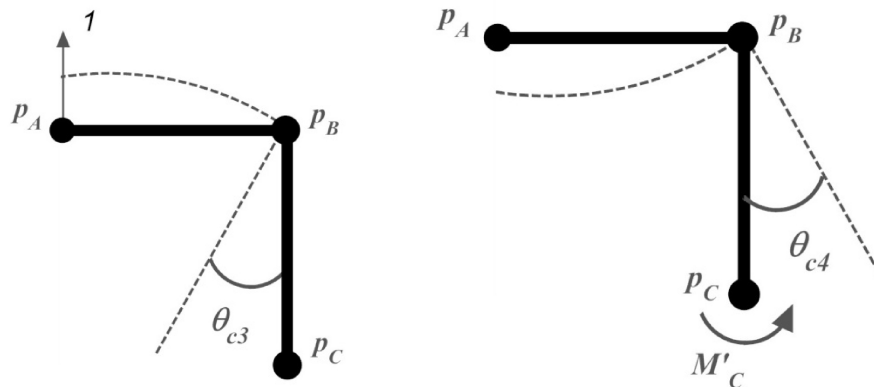


Fig. 4.5 - Rotação ponto C - carga unitária

$$\theta_{C3} = \frac{L_1^2}{2EI_1} \longrightarrow \theta_{C3} = \theta_{C4} \Rightarrow M'_C = \frac{L_1^2 I_2}{2(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \quad [3.5]$$

$$\theta_{C4} = \frac{M'_C L_1}{EI_1} + \frac{M'_C L_2}{EI_2}$$

Substituindo M'_C no sistema de equações 3.2 obtém-se M'_A .

$$M'_A = L_1 - \frac{L_1^2 I_2}{2(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \quad [3.6]$$

Conhecidas as reacções nos apoios é possível calcular os esforços (esforço axial (N), esforço transversal (V), momento flector (M)) nas duas vigas para o carregamento Q e para a carga unitária.

Tabela 4.1 - Equações das reacções do GR

Carga Distribuída	Carga Unitária
$N_{AB} = 0$	$N'_{AB} = 0$
$N_{BC} = QL_1$	$N'_{BC} = 1$
$V_{AB} = Qx$	$V'_{AB} = 1$
$V_{BC} = 0$	$V'_{BC} = 0$
$M_{AB} = -M_A + \frac{Qx^2}{2}$	$M'_{AB} = -M'_A + x$
$M_{BC} = M_C$	$M'_{BC} = M'_C$

O deslocamento vertical do ponto A , δ_A , é calculado pela seguinte expressão (onde apenas se consideram os termos não nulos da tabela acima).

$$\delta_A = \underbrace{\int_0^{L_1} \frac{M_{AB} M'_{AB}}{EI_1} \cdot dx}_I + \underbrace{\int_0^{L_2} \frac{M_{BC} M'_{BC}}{EI_2} \cdot dx}_{II} + \underbrace{\int_0^{L_1} \frac{V_{AB} V'_{AB}}{kA_1 G} \cdot dx}_{III} + \underbrace{\int_0^{L_2} \frac{N_{BC} N'_{BC}}{A_2 E} \cdot dx}_{IV} \quad [3.7]$$

Onde A_1 , A_2 , são respectivamente as áreas das vigas AB e BC , k_t é o coeficiente de Timoshenko e G o módulo de distorção. Este deslocamento ocorre devido à flexão da viga AB (I) e da viga BC (II), da deformação da viga AB por efeito do esforço transversal (III) e da deformação da viga BC por efeito do esforço axial (IV). Substituindo os esforços internos e integrando os vários termos, obtém-se as seguintes equações:

4.1.1.1. Deslocamentos

- Deslocamento devido à flexão da viga AB e BC:

$$\begin{aligned}
 I + II = & \frac{QL_1^4}{8EI_1} + \frac{QL_1^4 \left(-1 + \frac{L_1 I_2}{2(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \right)}{6EI_1} + \frac{QL_1^4 \left(-\frac{1}{2} + \frac{L_1 I_2}{3(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \right)}{2EI_1} + \\
 & + \frac{QL_1^4 \left(-\frac{1}{2} + \frac{L_1 I_2}{3(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \right) \cdot \left(-1 + \frac{L_1 I_2}{2(L_1 I_2 + L_2 I_1)} \right)}{EI_1} + \frac{QL_1^5 I_2 L_2}{6E(L_1 I_2 + L_2 I_1)^2}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

- Deslocamento devido ao esforço transversal da viga AB:

$$III = \frac{QL_1^2}{2k_t A_1 G} \tag{3.9}$$

- Deslocamento devido ao esforço axial da viga BC:

$$IV = \frac{QL_1 L_2}{A_2 E} \tag{3.10}$$

As componentes *III* e *IV* do deslocamento não contempladas nas equações fornecidas pela EFACEC melhoram o resultado final do deslocamento, no sentido em que estes passam a ser muito semelhantes aos obtidos com o modelo de elementos finitos do capítulo anterior.

Contudo, no caso do número de cutelos ser par e a variável x_5 (correspondente à espessura da chapa intermédia) ser zero, o valor do deslocamento calculado por estas equações é substancialmente diferente do obtido pelo MEF. Este facto ocorre porque, neste caso, para além da deformação devida aos termos calculados anteriormente pela teoria de vigas se deve somar a deformação associada ao comportamento da própria placa interior da VIGA 1. Por isso, nestas condições, é adicionada às equações anteriormente deduzidas uma fórmula que calcula o deslocamento no centro da placa interior (equação de *Roark* para o deslocamento em chapas encastradas, secção 4.1.2). Nesta situação o deslocamento aproxima-se do deslocamento calculado pelo método dos elementos finitos e a componente extra do deslocamento serve como penalização para o algoritmo de optimização.

4.1.1.2. Tensões

As equações usadas para calcular as tensões no centro e no canto da VIGA 1 são:

- Tensão Centro

$$\sigma_{centro} = \frac{M_1}{Z_1} \quad [3.11]$$

- Momento Flector Centro

$$M_{centro} = \frac{Q \times a^2}{24 \times (1 + k)} \quad [3.12]$$

- Tensão no Canto

$$\sigma_{canto} = \frac{M_{canto}}{Z_1} \quad [3.13]$$

- Momento Canto

$$M_{canto} = \frac{Q \times a^2}{12 \times (1 + k)} \quad [3.14]$$

Onde Z_1 e k são:

- Módulo Resistente

$$Z_1 = \frac{I_1}{D_{n1}} \quad [3.15]$$

- Constante de Inércia

$$k = \frac{I_1 \times b}{I_2 \times a} \quad [3.16]$$

O módulo resistente é calculado em função da distância do eixo neutro à placa interior (D_n) das respectivas vigas. Que é dado por:

- Distância do eixo neutro

$$D_{n1} = \frac{\left[\left(D_1 - \frac{x_1}{2} \right) \times A_{x1} \right] + \left[\left(D_1 - \frac{x_2}{2} \right) \times A_{x2} \right]}{A_{x1} + A_{x2}} \quad [3.17]$$

Onde A_{x1} e A_{x2} são as áreas da placa 1 e 2 respectivamente.

4.1.1.3. Áreas de secção e momentos de inércia

Para usar as equações até agora apresentadas é necessário calcular o I , A_v , e Z em função das 6 variáveis de projecto. Como exemplo apresentam-se as equações da VIGA 1.

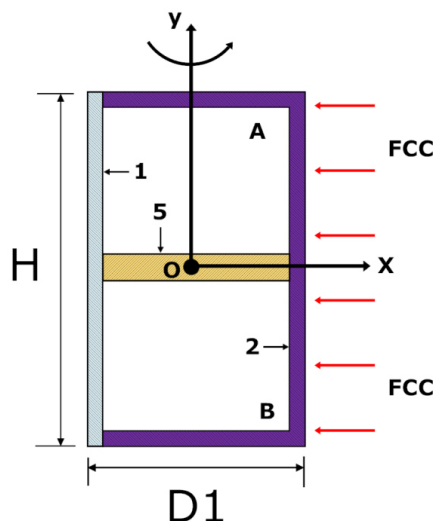


Fig. 4.6 - Esquema auxiliar para cálculo de momentos de inércia

Na figura 4.6 está ilustrada a secção transversal da VIGA 1, sujeita à FCC. Como constatado anteriormente, o GR representado na figura 4.1 sofre um deslocamento do ponto p_A que se traduz numa flexão da VIGA 1 em torno do eixo Y. Considerando que o referencial está centrado no ponto O pode calcular-se o momento de inércia da secção assumindo que esta é rectangular com dimensões $H \times D1$ e subtraindo depois o momento correspondente às zonas A e B. Tem-se então:

- Momento de inércia perfil sólido

$$I_{\text{sólido}} = \frac{H \times D1^3}{12} \quad [3.18]$$

- Momento de inércia zonas A e B

$$I_{A+B} = \frac{(H - 2 \times x_2) \times (D1 - x_1 - x_2)^3}{12} \quad [3.19]$$

- Momento de inércia placa 5

$$I_5 = \frac{x_5 \times (D1 - x_1 - x_2)^3}{12} \quad [3.20]$$

- Momento de inércia total

$$I_{\text{total}} = I_{\text{sólido}} - I_{A+B} + I_5 \quad [3.21]$$

O cálculo da área é efectuado de forma semelhante. Assume-se que a viga é rectangular com dimensões $H \times D1$ e subtrai-se depois as áreas correspondente às zonas A e B. Então:

- Área perfil sólido

$$A_{solido_1} = H \times D1 \quad [3.22]$$

- Área zonas A e B

$$A_{A+B} = (H - 2 \times x_2) \times (D1 - x_1 - x_2) \quad [3.23]$$

- Área placa 5

$$A_{x5} = x_5 \times [D1 - (x_1 + x_2)] \quad [3.24]$$

- Área total

$$A_{total_1} = A_{solido_1} - A_{A+B} + A_{x5} \quad [3.25]$$

Os cálculos da VIGA 2 são efectuados de forma análoga.

4.1.1.4. Massa

O cálculo da massa é calculado multiplicando a área de secção da viga vezes o seu comprimento, vezes densidade do aço. Para a VIGA 1 a equação é:

$$massa_{VIGA1} = A_{total_1} \times A \times 7850 \quad [3.26]$$

À massa das vigas é também adicionada a massa dos cutelos. Se considerarmos que os cutelos têm 8 mm de espessura o cálculo é efectuado da seguinte forma:

$$massa_{cutelos} = ((D1 - x_1 - x_2) \times (H - 2 \times x_2) - x_5) \times NC \times 0,008 \quad [3.27]$$

A massa total da estrutura é então:

$$massa_{total} = massa_{VIGA1} + massa_{VIGA2} + massa_{cutelos} \quad [3.28]$$

4.1.2. CÁLCULO DA TENSÃO E DESLOCAMENTO NA PLACA INTERIOR DA VIGA 1

Para o cálculo desta tensão foram testadas duas fórmulas, a de *Roark* e a de *Dubbel*. A aplicação destas depende dos parâmetros que definem a placa interior e do número de cutelos. A metodologia para a sua aplicação é explicada nas seguintes secções:

4.1.2.1. Fórmulas de *Roark*

As equações de *Roark* calculam as tensões e o deslocamento no centro da placa interior da VIGA 1. Para o cálculo da tensão, assume-se que a placa está sujeita a uma pressão uniforme Q , e condições fronteira semelhantes ao encastramento (figura 4.8).

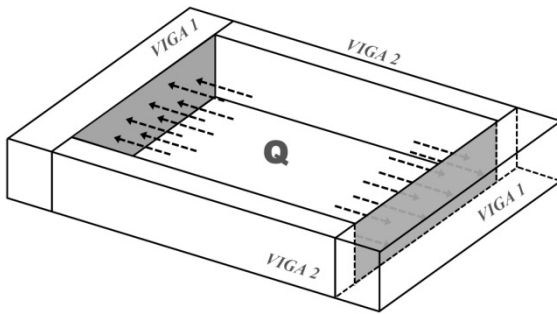


Fig. 4.7 - Placa interior sujeita a pressão uniforme

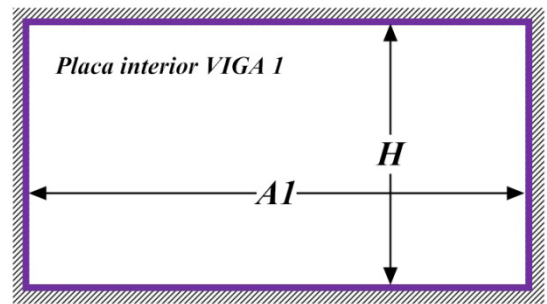


Fig. 4.8 - Condições fronteira VIGA 1

A equação que determina a tensão no centro da placa para placas sujeitas às condições assumidas é:

$$\sigma_{placa} = \frac{\beta \times Q \times H^2}{x_2^2} \quad [3.29]$$

Onde β é um coeficiente que depende de $\frac{AI}{H}$.

Na figura 4.8 está ilustrada uma configuração do GR ausente de cutelos e placa 5. Contudo, a ausência de cutelos não é uma solução realista, e a placa 5 pode ou não estar presente na VIGA 1, já que “zero” é um dos valores admissíveis para esta variável. Com a introdução desses elementos, a dimensão da chapa cuja tensão se pretende determinar diminui, porque as zonas de contacto da face interior da VIGA 1 com os cutelos e a placa 5 estão sujeitas a condições fronteira semelhantes ao encastramento. Como exemplo, na figura 4.9 está representado o interior da VIGA 1 com 3 cutelos e com a placa 5.

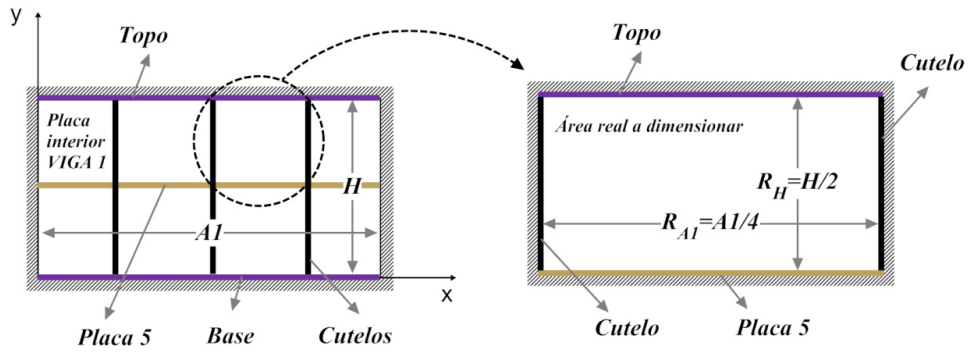


Fig. 4.9 - Área real a dimensionar

As equações que determinam as dimensões da área real são então:

$$R_{A1} = \frac{A1}{(\text{Número de cutelos} + 1)} \quad [3.30]$$

$$R_H = \frac{H}{2} \quad (\text{existência de placa 5}) \quad \text{ou} \quad R_H = H \quad (\text{ausência de placa 5}) \quad [3.31]$$

Logo, a equação da tensão no centro da área real é:

$$\sigma_{\text{placa_centro}} = \frac{\beta \times Q \times R_H^2}{x_2^2} \quad [3.32]$$

Onde β é um coeficiente que depende de $\frac{R_{A1}}{R_H}$.

O deslocamento no centro da placa apenas é calculado quando temos um número de cutelos ímpar e ausência de placa intermédia, figura 4.10:

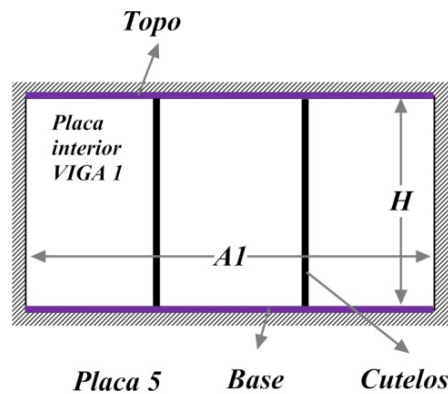


Fig. 4.10 - VIGA 1 - 2 Cutelos e placa 5 ausente

A equação utilizada para calcular o deslocamento é:

$$\delta_{centro_placa} = \frac{\alpha \times Q \times H^4}{E \times x_2^3} \quad [3.33]$$

Sendo que α é um coeficiente que depende de $\frac{A1}{(Número\ de\ cutelos+1)}$

4.1.2.2. Fórmula de *Dubbel*

Para o cálculo da tensão na placa 5 pela fórmula de *Dubbel* também se assumem as condições anteriormente consideradas para o cálculo da equação de *Roark*. Genericamente a equação é:

$$\sigma_{placa_centro} = \frac{0,21 \times Q \times A_1^2 \times H^2}{x_2^2 \times (A_1^2 \times H^2)} \quad [3.34]$$

Tal como na equação de *Roark* esta fórmula também depende do número de cutelos e da ausência ou não da placa 5, por isso temos:

$$D_{A1} = \frac{A1}{(Número\ de\ cutelos + 1)} \quad [3.35]$$

$$D_H = \frac{H}{2} \text{ (existência de placa 5)} \quad \text{ou} \quad D_H = H \text{ (ausência de placa 5)} \quad [3.36]$$

Logo, a equação final é:

$$\sigma_{placa_centro} = \frac{0,21 \times Q \times D_{A1}^2 \times D_H^2}{x_2^2 \times (D_{A1}^2 \times D_H^2)} \quad [3.37]$$

Capítulo 5

INTERFACE GROPTI

O *GROPTI* é um programa desenvolvido inteiramente em MATLAB que permite efectuar optimizações do GR. Possui uma interface gráfica que torna fácil e rápido o processo de optimização. Todas as opções disponíveis e resultados são apresentados nessa interface gráfica, evitando assim recorrer à linha de comandos do MATLAB.

5.1.1. ESTRUTURA DE FICHEIROS

O programa, desenvolvido totalmente em linguagem MATLAB é constituído por vários ficheiros e pastas. A estrutura de ficheiros está organizada da seguinte forma:

Tabela 5.1 - Estrutura de ficheiros GROPTI

Nome	Tipo	Descrição
GROPTI.m	ficheiro	Ficheiro (oculto) que contém o código necessário para correr a interface gráfica.
GROPTI.fig	ficheiro	Executável do programa.
PARAMETROS	pasta	Pasta que contém os parâmetros de cada GR.
ALGORITMOS	pasta	Pasta que contém os algoritmos de optimização.
RESULTADOS	pasta	Pasta que contém os resultados de optimização obtidos.

O programa não necessita de instalação, basta que o utilizador possua o MATLAB instalado. Em caso algum os nomes dos ficheiros ou pastas descritos na tabela 5.1 podem ser alterados, o único ficheiro que o utilizador terá de editar será um ficheiro de texto que contém os parâmetros dos GR's.

5.1.1.1. Pasta de resultados e ficheiros de output

Em cada optimização efectuada o programa cria uma subpasta no interior da pasta “RESULTADOS” que contém os ficheiros resultantes da análise efectuada. A subpasta tem um nome definido pelo utilizador (“OPT” por defeito), o algoritmo utilizado, o nome do ficheiro de texto carregado (ver secção 5.1.3) e a data e hora em que o cálculo é efectuado.

Por exemplo:

Tabela 5.2 - Nome pasta resultados

Directório
“RESULTADOS\OPT_GA_Monofasico.txt - 01_04_2010 - 17_40_06” ficheiros de output”
Descrição
Optimização do transformador monofásico com algoritmos genéticos realizada dia 1 de Abril de 2010 às 17h 40min e 6s.

Os ficheiros resultantes da optimização gerados e colocados na subpasta são os seguintes:

Tabela 5.3 - Ficheiros resultantes

Nome	Tipo	Descrição
relatorio.txt	texto	Ficheiro de resultados
GA_EFACEC.jpg	imagem	Gráfico generation vs fitness value

O ficheiro “relatorio.txt” contém todas as informações sobre a optimização efectuada, tais como os constrangimentos considerados, as opções seguidas para o algoritmo escolhido e os resultados obtidos.

O gráfico “*generation vs fitness value*” é criado apenas quando se optimiza o GR utilizando o algoritmo genético ou híbrido e apresenta o valor da função objectivo médio e mínimo em cada geração.

5.1.2. INTERFACE GRÁFICA GROPTI

The screenshot shows the GROPTI graphical user interface. It features several input fields and buttons. Numbered callouts are placed over specific elements: 1 points to the 'Tipo de análise' dropdown; 2 points to the 'Directório ANSYS' text field; 3 points to the 'D. Elem. [m]' text field; 4 points to the 'Des. Adm [mm]' input field; 5 points to the 'Constante' input field; 6 points to the 'Ficheiro de texto' dropdown; 7 points to the 'Placa 1 [mm]' input field; 8 points to the 'Global [MPa]' input field; 9 points to the 'Final [Kg]' input field; and 10 points to the 'Nome' text field in the 'Pasta de Resultados' section. The interface includes sections for 'Constrangimentos', 'Opções Algoritmo Genético', 'Parâmetros', 'Pasta de Resultados', 'Espessuras Finais', 'Tensões e Deslocamentos Máx.', and 'Massa'. A large 'START' button is located at the bottom center.

Fig. 5.1 - Interface gráfica GROPTI

A interface gráfica do programa *GROPTI* permite que todas as opções disponíveis estejam reunidas num menu simples de usar, evitando assim que se tenha de recorrer à linha de comandos do MATLAB. A interface permite também escolher com facilidade qualquer conjunto de parâmetros de um GR. As opções disponíveis são:

1. Tipo de Análise

Neste campo o utilizador escolher que tipo de análise pretende realizar. Pode escolher entre a optimização analítica usando os AG's ou híbrido, e optimização com algoritmo híbrido baseada no MEF linear ou não linear. Neste campo também é possível escolher a opção que permite modelar de forma automática no ANSYS o GR com os parâmetros e variáveis obtidas pela última análise efectuada de qualquer algoritmo, basta para isso escolher a opção “*Modelar*”.

2. Directório ANSYS

Neste campo introduz-se o directório do executável do *ANSYS*. O seu preenchimento é obrigatório para a optimização baseada no MEF e para a opção “*Modelar*” do campo 1.

3. Dimensão elemento

Sempre que se realiza uma análise pelo MEF, é necessário designar o tamanho do elemento *shell181*. É recomendado usar um valor entre os 50 mm e 100 mm.

4. Constrangimentos

Neste campo especificam-se os valores máximos admissíveis das tensões e dos deslocamentos usados para definir os constrangimentos.

5. Opções do Algoritmo Genético

Todas as opções relativas ao AG estão disponíveis neste campo. Os valores admitidos por defeito têm produzido os melhores resultados nas optimizações realizadas.

6. Parâmetros

Permite escolher o ficheiro de texto correspondente ao GR que se pretende otimizar. Todos os ficheiros contidos na pasta “*PARAMETROS*” estão disponíveis para escolha neste menu. É possível também especificar o valor para o número de cutelos (parâmetro *NC*).

7. Espessuras Finais

Campo que indica a espessura final de cada placa. Os números das placas correspondem aos das placas indicadas na figura 2.6.

8. Tensões e deslocamentos máximos

Tensões e deslocamentos das zonas avaliadas para a solução otimizada. Estes não podem ultrapassar os valores dos constrangimentos do campo 4.

9. Massa

Massa do GR para a solução otimizada. O ganho apenas é calculado se for indicada uma massa inicial no ficheiro de texto que contém os parâmetros do GR otimizado (ver secção 5.1.3).

10. Pasta de resultados

Designação que faz parte do nome da subpasta que contém os ficheiros resultantes da optimização.

5.1.3. CRIAR UMA NOVA ANÁLISE

A metodologia apresentada orienta o utilizador para possa facilmente otimizar qualquer GR com um conjunto de parâmetros novos.

A pasta “PARAMETROS” tem especial importância pois contém os ficheiros de *input* dos parâmetros do GR que se pretende otimizar. Para criar um novo conjunto de parâmetros basta criar um novo ficheiro de texto com o nome que se desejar. Os dados têm de ser dispostos exactamente da forma apresentada na figura 5.2, sendo preferível criar uma cópia de um ficheiro já existente e alterar apenas os valores dos parâmetros. O nome do novo ficheiro (e de todos os existentes na pasta “PARAMETROS”) estará disponível para escolha na interface gráfica (campo 6 da figura 5.1) e irá fazer parte do nome da subpasta criada no fim da optimização.

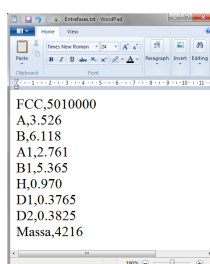


Fig. 5.2 - Ficheiro de parâmetros

Capítulo 6

RESULTADOS

Os três transformadores estudados são actualmente fabricados pela EFACEC. O conjunto de parâmetros que caracteriza cada um foi obtido com recurso a desenhos técnicos de construção soldada disponibilizados pela EFACEC. Foi efectuada a optimização dos três, recorrendo ao programa GROPTI e usando tanto o modelo numérico como o modelo analítico desenvolvido, o que permitiu comparar os resultados obtidos.

Em todos os casos foi optimizada a massa e foram consideradas as variáveis indicadas da figura 2.6 e na tabela 2.2. O constrangimento de deslocamento foi sempre calculado considerando um deslocamento admissível de 8 mm. Os valores admissíveis para os constrangimentos de tensão variaram, assim como o tipo de análise e o modelo utilizado. Considerando o comportamento linear da estrutura, foram realizadas optimizações empregando tanto o modelo numérico como o modelo analítico. Em algumas dessas optimizações, designadas por 275 foi considerado um limite para a tensão na placa de 275 MPa, e um limite para a tensão no centro e no canto de 420 MPa. Noutras optimizações designadas por 420, foi considerado o valor limite para todas as tensões iguais a 420 MPa. Finalmente noutras optimizações, referidas por SC foram retirados os constrangimentos de tensão, sendo apenas assumido o valor limite no deslocamento. O modelo analítico assume sempre comportamento linear. Para avaliar se o facto de assumir comportamento não linear poderá ter alguma influência sobre os resultados realizou-se a optimização dos GR's utilizando o modelo numérico com esse comportamento. Neste caso, referenciado por 300, considerou-se que o valor limite para as tensões era sempre igual 300 MPa.

Os resultados para as optimizações do TM, TT e TE são apresentados respectivamente nas secções 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3. Nas tabelas onde se indicam as soluções obtidas em cada caso, a coluna “Actual” mostra os deslocamentos, tensões e a massa correspondentes à solução apresentada pela EFACEC. As colunas 275, 420 e SC mostram as soluções obtidas quando se consideram os três valores dos constrangimentos indicados anteriormente. No caso de se assumir comportamento não linear os resultados são apresentados na coluna 300. A curva tensão - deformação do aço usado na optimização não linear é representada na figura 6.1.

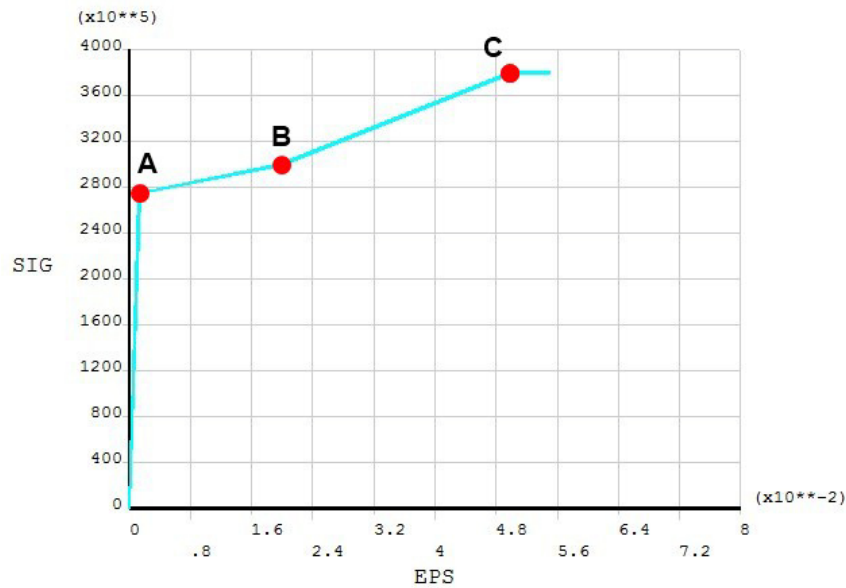


Fig. 6.1 - Curva tensão - deformação aço 275S

Os pontos representados na figura são:

Tabela 6.1 - Pontos curva tensão - deformação

Ponto	Tensão [MPa]	Deformação
A	275	0,00131
B	300	0,02
C	380	0,05

São ainda apresentados os tempos de cálculo em cada caso necessários para otimizar os GR's com o modelo numérico e programa ANSYS. Nas otimizações realizadas empregando o modelo analítico, esses tempos são sempre inferiores a 10 segundos e não são indicados.

O cálculo das tensões no modelo analítico foi realizado usando as fórmulas de Roark e de Dubbel apresentadas na secção 4.1.2, tendo se constatado que o valores obtido eram ligeiramente diferentes entre si. Nas soluções apresentadas no capítulo 6 todos os cálculos da tensão na placa interior envolvendo o modelo analítico recorrem à equação de Dubbel.

6.1. DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO IDEAL DO ELEMENTO PARA O MEF

As análises baseadas no MEF podem ser extremamente morosas se o tamanho do elemento for excessivamente pequeno. Por norma uma malha mais fina representa uma maior precisão de resultados, no entanto é necessário determinar a dimensão do elemento que produza bons resultados num tempo de cálculo razoável. Por isso, efectuaram três otimizações do TM para diferentes dimensões do elemento. Os resultados obtidos são:

Tabela 6.2 - Tensões e desloc. finais para diferentes dimensões do elemento no MEF

D. Elemento [mm]	T. Placa [MPa]	T.Centro [MPa]	T.Canto [MPa]	Desl. [mm]	Tempo de Cálculo [hh:mm:ss]	Massa [Kg]
20	235	194	202	7,95	24:30:10	7733
50	234	182	160	7,96	00:34:08	
100	231	170	130	7,98	00:19:07	

Tabela 6.3 - Variáveis de projecto finais para diferentes dimensões do elemento no MEF

Dimensão do Elemento [mm]	x ₁ [mm]	x ₂ [mm]	x ₃ [mm]	x ₄ [mm]	x ₅ [mm]	x ₆ [mm]
20	10	40	8	12	12	8
50						
100						

Os resultados apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2 permitem concluir que é absolutamente desnecessário efectuar cálculos com elementos de dimensão 20 e 50 mm. Um cálculo com elementos de 100 mm conduz à mesma solução que a obtida com elementos de dimensão menor, num tempo de processamento bastante inferior. Por esta razão, todos os resultados apresentados para as optimizações efectuadas segundo o MEF utilizam elementos de tamanho igual a 100 mm.

6.1.1. TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

6.1.1.1. Dimensões globais, espessuras e FCC

Tabela 6.4 - Características solução actual - TM

Dimensões Globais [mm]							FCC [N]
H	D1	D2	A	A1	B	B1	10610000
1165	491	346	3624	2932	3078	2096	

Espessuras Placas [mm]					
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
16	16	8	12	16	16

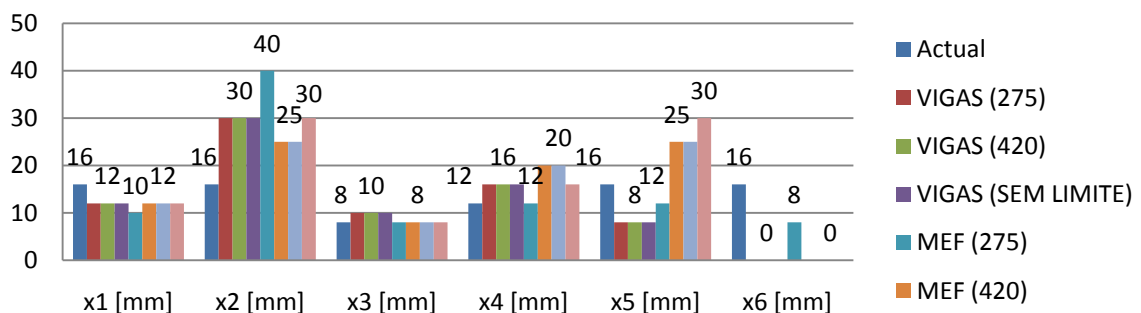
6.1.1.2. Resultados TM

Tabela 6.5 - Resultados - TM

	Analítico				MEF				
	Actual	275	420	SC	Actual	275	420	SC	300
δ_{centro} [mm]	10,14	7,98	7,98	7,98	10,15	7,98	7,90	7,90	7,98
σ_{placa} [MPa]	295	84	84	84	680	231	368	368	275
σ_{canto} [MPa]	295	244	244	244	180	130	156	156	125
σ_{centro} [MPa]	348	244	244	244	420	170	260	260	233
Massa [Kg]	5220	6535	6535	6535	5402	7733	6806	6806	7312
T. Cálculo [hh:mm:ss]	-	-	-	-	-	00:36:51	00:23:23	00:21:07	00:31:26

Placa	Distribuição de espessuras						
	Vigas			MEF			
	275	420	SC	275	420	SC	300
x_1	12			10	12		12
x_2	30			40	25		30
x_3	10			8	8		8
x_4	16			12	20		16
x_5	8			12	25		30
x_6	0			8	0		0

Distribuição de espessuras - Monofásico



6.1.2. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

6.1.2.1. Dimensões globais, espessuras e FCC

Tabela 6.6 - Características solução actual - TT

Dimensões Globais [mm]							FCC [N]
H	D1	D2	A	A1	B	B1	14800000
990	530	381,5	3352	2589	7514	6454	

Espessuras Placas [mm]					
x_2	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
16	20	20	25	25	16

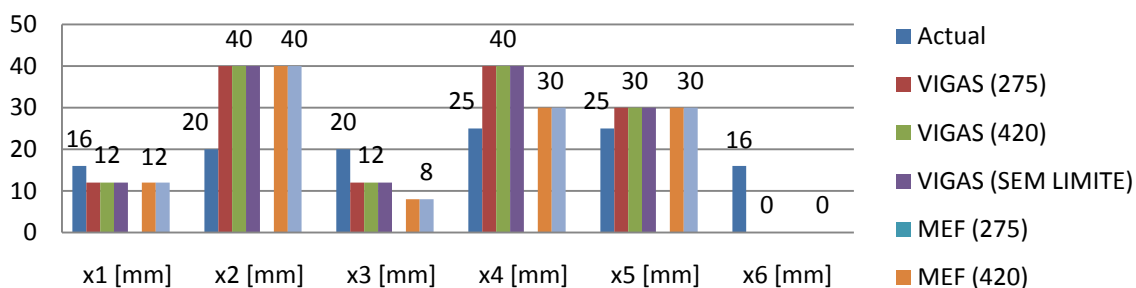
6.1.2.2. Resultados TT

Tabela 6.7 - Resultados - TT

	Analítico				MEF				
	Actual	275	420	SC	Actual	275	420	SC	300
δ_{centro} [mm]	10,92	7,97	7,97	7,97	10,41	Sem solução admissível	7,96	7,96	Não convergiu
σ_{placa} [MPa]	320	80	80	80	654		285	285	
σ_{canto} [MPa]	184	126	126	126	149		120	120	
σ_{centro} [MPa]	381	157	157	157	228		130	130	
Massa [Kg]	11050	13950	13950	13950	11544		12540	12540	
T. Cálculo [hh:mm:ss]	-	-	-	-	-		00:25:21	00:17:42	

Placa	Distribuição de espessuras						
	Vigas			MEF			
	275	420	SC	275	420	SC	300
x_1	12			-	12	-	-
x_2	40			-	40	-	-
x_3	12			-	8	-	-
x_4	40			-	30	-	-
x_5	30			-	30	-	-
x_6	0			-	0	-	-

Distribuição de espessuras - Trifásico



6.1.3. TRANSFORMADOR ENTREFASES

6.1.3.1. Dimensões globais, espessuras e FCC

Tabela 6.8 - Características solução actual - TE

Dimensões Globais [mm]							FCC [N]
H	D1	D2	A	A1	B	B1	5010000
970	376,5	382,5	3526	2761	6118	5365	

Espessuras Placas [mm]					
x_2	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
10	10	10	10	10	10

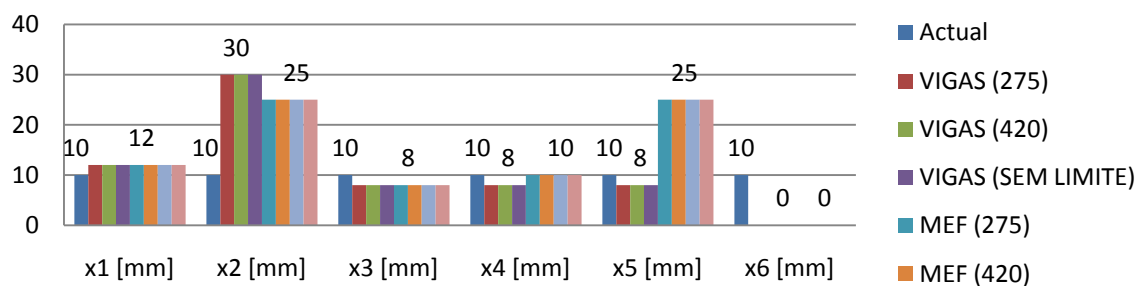
6.1.3.2. Resultados TE

Tabela 6.9 - Resultados - TE

	Analítico				MEF				
	Actual	275	420	SC	Actual	275	420	SC	300
δ_{centro} [mm]	11,91	7,93	7,93	7,93	12,53	7,91	7,91	7,91	7,86
σ_{placa} [MPa]	310	35	35	35	668	231	231	231	231
σ_{canto} [MPa]	197	190	190	190	114	86	86	86	88
σ_{centro} [MPa]	367	190	190	190	203	107	107	107	106
Massa [Kg]	4702	5773	5773	5773	4827	6201	6201	6201	6202
T. Cálculo [hh:mm:ss]	-	-	-	-	-	00:20:31	00:22:08	00:23:10	00:47:58

Placa	Distribuição de espessuras						
	Vigas			MEF			
	275	420	SC	275	420	SC	300
x_1	12			12			
x_2	30			25			
x_3	8			8			
x_4	8			10			
x_5	8			25			
x_6	0			0			

Distribuição de espessuras - Entrefases



6.2. ANÁLISE DE RESULTADOS

Observando as tabelas 6.4, 6.6 e 6.8, com os valores obtidos para a optimização dos transformadores monofásico, trifásico e entrefases pode constatar-se que:

1. Os valores das espessuras que constam nos três projectos recebidos da EFACEC são sempre inferiores aos obtidos pelo programa de optimização desenvolvido. Provavelmente esse facto poderá ser devido ao uso de metodologias de cálculo distintas das usadas nestes programas, ou de valores diferentes dos limites para as tensões e deslocamentos.
2. As soluções obtidas pelo programa de optimização usando o modelo simplificado e o modelo de elementos finitos podem ser consideradas muito semelhantes quando se optimizam os três GR's dos transformadores fornecidos e quando o constrangimento do deslocamento é o constrangimento único ou é dominante. Essa semelhança ocorre tanto ao nível da massa como ao nível da distribuição de espessuras.

Contudo, se o constrangimento de deslocamento não for dominante, como ocorre na optimização por elementos finitos no transformador monofásico, a solução óptima obtida para cada um dos métodos apresenta diferenças entre si. Isto porque o modelo do ANSYS permite uma análise detalhada das tensões, com todos os efeitos associados à concentração de tensões na ligação entre as várias placas, que não são calculados no modelo analítico. A tensão na placa é a que apresenta maiores diferenças entre os dois modelos. Para o cálculo desta tensão no modelo analítico foi utilizada a equação de Dubbel.

3. Foram usados dois valores diferentes para a tensão limite na placa, 275 MPa e 420 MPa, que conduziram a soluções óptimas diferentes. No modelo analítico, e porque as tensões calculadas neste modelo são inferiores, não se registaram diferenças nos resultados. Quando se recorreu ao ANSYS, e porque neste modelo as tensões são mais elevadas, já se observaram algumas diferenças. Estas dependem contudo do valor limite imposto para o deslocamento. Para o valor de 8 mm utilizado verifica-se que este é o único constrangimento activo em todos os casos excepto no transformador monofásico. Valores mais elevados do limite no deslocamento irão com certeza diminuir a importância deste constrangimento e aumentar a importância dos restantes.

4. A optimização com recurso às análises não lineares permite um melhor conhecimento sobre o comportamento do modelo. Porém nalguns casos a solução não convergiu (como no caso do transformador trifásico) e noutros o tempo de cálculo duplicou em relação à análise linear, e dada a importância do constrangimento de deslocamento nos problemas tratados, não se registaram resultados significativamente diferentes em relação à optimização linear. Parece por isso não se justificar a opção de efectuar análises não lineares durante o processo de optimização.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida resolve com eficácia os problemas de optimização do GR, como se pretendia.

Para testar esta metodologia foram usados três transformadores já existentes. As soluções óptimas obtidas são substancialmente diferentes das apresentadas pela EFACEC. Dada a grande experiência demonstrada por esta empresa no projecto de transformadores, e devido ao facto dos três transformadores estarem actualmente operacionais, parece poder concluir-se que por um lado as metodologias utilizadas nos três projectos foram diferentes das desenvolvidas nesta dissertação e, por outro lado, que os valores limite usados para as tensões e deslocamentos foram provavelmente distintos.

Uma das questões permanentemente analisadas durante toda a dissertação prende-se com o facto da pressão de curto-circuito estar associada a um carregamento dinâmico, com uma elevada velocidade de aplicação. O uso de cargas estaticamente aplicadas equivalentes no projecto do GE conduz a dois tipos de aproximações:

1. A força de curto-circuito exercida ao nível dos núcleos de cobre pode não se transmitir integralmente sobre o GR, pois uma parte irá contribuir para a aceleração do núcleo de cobre, óleo de refrigeração e paredes do transformador.
2. O comportamento do aço empregue na construção é muito diferente para carregamentos quasi-estáticos e para carregamentos aplicados com velocidades elevadas. Em particular, neste último caso, a tensão limite a partir do qual o comportamento deixa de ser elástico pode aumentar significativamente.

É a grande experiência que a empresa adquiriu no projecto destes equipamentos que valida as metodologias actualmente usadas e as soluções por elas obtidas. A utilização de modelos numéricos sofisticados como os modelos não-lineares de elementos finitos gerados com o programa ANSYS e o uso de algoritmos de optimização estrutural como os usados nesta dissertação poderá aconselhar a investigação do fenómeno do curto-circuito no transformador e o desenvolvimento de modelos dinâmicos que possam ser usados no projecto do GR.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Maxwell, *Scientific Papers II*, 175th ed., Cambridge University Press, Ed., 1890.
- [2] A.G.M. Mitchell, "The limits of economy of material in framed structures," *Phil. Mag.*, vol. series 6,8, pp. 589-597, 1904.
- [3] L.A. Schmidt, "Structural design by systematic synthesis," *Proceedings of the second Conference on Electronic Computation*, pp. 105-122, 1960.
- [4] F. Glover, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence," *Computers and operations research*, vol. 13, pp. 533-549, 1986.
- [5] Jasbir Arora, *Introduction to Optimum Design*, 2nd ed.: Elsevier, 2004.
- [6] D.E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley, Ed. Reading M.A., 1989.
- [7] Ricardo Amaral, "Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica," Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, Dissertação 2008.
- [8] P. Hajela, E. Lee, and C.Y. Lin, *Genetic algorithms in structural topology optimisation*, M.P. Bendsoe and C.A.M. Soares, Ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [9] Pedro Coelho, "Meta-Heurísticas Aplicadas em Optimização Estrutural," Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Trabalho de Síntese 2003.
- [10] João Cardoso, "Introdução ao Método dos Elementos Finitos," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Apontamentos das aulas.
- [11] Erdogan Madenci and Ibrahim Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*, Springer, Ed., 2006.
- [12] ANSYS. ANSYS Help documentation.
- [13] P. Venkataraman, *Applied Optimization with Matlab Programming*, Second Edition ed.: Wiley, 2009.
- [14] Matlab. Matlab Help Documentation.

ANEXOS

7.1. FICHEIRO APDL

```
!Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciência e Tecnologia
!Tese de Mestrado, Hugo Bretas de Oliveira Cabrita, 2009/2010
!-----
!EFACEC
!Modelo de casca do GRANDE REFORÇO
!-----
!
! *** Inicia o pré-processador ***
! *****
!
/PREP7
BCSOPTION,,INCORE
!
/INPUT,'parametros','txt'      !Importa os parametros
/INPUT,'RC','txt'             !Importa as real constants atribuidas pelo algoritmo de optimização
KEYOPT,1,3,2
!
!
! *** Tipo de Elemento e Real Constants ***
! *****
!
ET,1,SHELL181                 !Define o tipo de elemento
MP,EX,1,210E9                 !Material Props - Material Models - Structural - Linear - Elastic Isotropic EX=210e9
MP,PRXY,1,0.3                 !Material Props - Material Models - Structural - Linear - Elastic Isotropic PRXY=0.3
MP,DENS,1,7850                !Material Models - Structural - Density - DENS=7850
!
!
! *** Modelação ***
! *****
!
!Keypoints de Canto
!
K,1,0,0,0
K,2,0,-D,0
K,3,0,0,H/2
K,4,0,-D,H/2
K,5,0,0,H
K,6,0,-D,H
K,7,D1,0,0
K,8,D1,-D,0
K,9,D1,0,H/2
K,10,D1,-D,H/2
K,11,D1,0,H
K,12,D1,-D,H
!
!Keypoints e linhas dos perfis que serão usados para definir os constrangimentos de simetria
!
! ** Perfil Viga 1 **
!
Numstr,LINE,1
!
K,13,A/2,0,0
K,14,A/2,0,H/2
K,15,A/2,0,H
K,16,A/2,-D,0
K,17,A/2,-D,H/2
K,18,A/2,-D,H
!
L,13,16
L,16,17
L,17,18
```

```

L,18,15
L,15,14
L,14,13
L,14,17
!
!
! ** Determinação da distância do ultimo cutelo ao centro **
!
!Se o numero de cutelos for impar temos:
*if,NC,EQ,1,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,3,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,5,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,7,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,9,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,11,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,13,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,15,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,17,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
*if,NC,EQ,19,THEN
    DV=0
    DIV=(NC+1)/2
    POUI=1
*endif
!
!Se o numero de cutelos for par temos:

```



```

*if,NC,EQ,2,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,4,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,6,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,8,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,10,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,12,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,14,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,16,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,18,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
*if,NC,EQ,20,THEN
  DV=((A-D1*2)/(NC+1))/2
  DIV=NC/2
  POUI=2
*endif
!
! Pontos de coincidência placa 1
*if,POUI,EQ,2,THEN
  KGEN,2,13,18,1,-DV,,,1,0
  L,19,20
  L,20,21
  L,22,23
  L,23,24
  L,24,21
  L,22,19
  L,23,20

```

```

*endif
!
! ** Perfil Viga 2 **
!
K,25,0,(B1/2),0
K,26,D1,(B1/2),0
K,27,0,(B1/2),H/2
K,28,D1,(B1/2),H/2
K,29,0,(B1/2),H
K,30,D1,(B1/2),H
L,25,26
L,28,27
L,30,29
L,26,28
L,28,30
L,29,27
L,27,25
!
!
! ** Construção da VIGA 1 **
!
!Se existirem mais que dois cutelos temos:
!
*if,NC,GT,2,THEN
!
! ** Viga 1 e cutelos **
!
!Lateral Exterior
Numstr,LINE,200
KGEN,2,7,12,1,(((A-D1*2)))/(NC+1),,,,1,0
A,2,8,10,4
A,4,10,12,6
!
*if,POUI,EQ,1,THEN
A,8,20,22,10
A,10,22,24,12
*endif
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
A,8,32,34,10
A,10,34,36,12
*endif
!
AGEN,DIV,3,4,1,(((A-D1*2)))/(NC+1),,,,1,0
*if,POUI,EQ,2,THEN
A,23,17,18,24
A,22,16,17,23
*endif
!
NUMMRG,KP,,,
!
!Topo
NUMSTR,AREA,100
A,6,12,11,5
!
*if,POUI,EQ,1,THEN
A,12,24,23,11
*endif
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
A,12,36,35,11
*endif
!
AGEN,DIV,101,101,1,(((A-D1*2)))/(NC+1),,,,1,0
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
A,24,18,15,21
*endif
NUMMRG,KP,,,
!

```

```

!Lateral Interior
NUMSTR,AREA,200
A,5,11,9,3
A,9,7,1,3
!
*if,POUI,EQ,1,THEN
  A,11,23,21,9
  A,9,21,19,7
*endif
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
  A,11,35,33,9
  A,9,33,31,7
*endif
!
  AGEN,DIV,202,203,1,(((A-D1*2)))/(NC+1),,,,1,0
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
  A,20,14,13,19
  A,21,15,14,20
*endif
  NUMMRG,KP,,,,
!
  !Vao Central
  NUMSTR,AREA,300
  A,4,10,9,3
  !
*if,POUI,EQ,1,THEN
  A,10,22,21,9
*endif
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
  A,10,34,33,9
*endif
!
  AGEN,DIV,301,301,1,(((A-D1*2)))/(NC+1),,,,1,0
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
  A,23,17,14,20
*endif
!
  NUMMRG,KP,,,,
!
  !Base
  NUMSTR,AREA,400
  A,1,2,8,7
  !
*if,POUI,EQ,1,THEN
  A,8,20,19,7
*endif
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
  A,8,32,31,7
*endif
!
  AGEN,DIV,401,401,1,(((A-D1*2)))/(NC+1),,,,1,0
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
  A,22,16,13,19
*endif
  NUMMRG,KP,,,,
!
  !Cutelos
  NUMSTR,AREA,500
  A,11,9,10,12
  A,9,7,8,10
  AGEN,DIV+1,500,501,1,(((A-D1*2)))/(NC+1),,,,1,0
!
  NUMMRG,KP,,,,
*endif

```

```

!
!
!Se existirem exactamente dois cutelos temos:
!
*if,NC,EQ,2,THEN
!
! ** Viga 1 **
!
!Lateral Exterior
NUMSTR,AREA,1
NUMSTR,LINE,200
A,2,8,10,4
A,4,10,12,6
A,8,16,17,10
A,10,17,18,12
NUMMRG,KP,,,,
!
!Topo
NUMSTR,AREA,100
A,6,12,11,5
A,11,12,18,15
NUMMRG,KP,,,,
!
!Lateral Interior
NUMSTR,AREA,200
A,7,1,3,9
A,3,5,11,9
A,7,9,14,13
A,14,9,11,15
NUMMRG,KP,,,,
!
!Base
NUMSTR,AREA,400
A,1,2,8,7
A,7,8,16,13
NUMMRG,KP,,,,
!
!Cutelo
NUMSTR,AREA,500
A,9,10,12,11
A,7,8,10,9
NUMMRG,KP,,,,
!
!Vao Central
NUMSTR,AREA,300
A,4,10,9,3
A,9,10,17,14
NUMMRG,KP,,,,
*endif
!
! ** Viga 2 **
!
!Lateral Exterior
NUMSTR,AREA,600
A,1,2,4,3
A,3,4,6,5
A,25,1,3,27
A,27,3,5,29
NUMMRG,KP,,,,
!
!Topo
NUMSTR,AREA,700
A,5,11,30,29
NUMMRG,KP,,,,
!
!Lateral Interior
NUMSTR,AREA,800
A,7,26,28,9
A,9,28,30,11
NUMMRG,KP,,,,

```

```

!
!Base
NUMSTR,AREA,900
A,26,25,1,7
NUMMRG,KP,,
!
!Vao
NUMSTR,AREA,1000
A,3,9,28,27
NUMMRG,KP,,
!
!
! *** Fim da Modelação ***
! *****
!
!
!
! ** Geração da Malha **
! *****
!
!
ESIZE,D_ELE,0          !Define o tamanho do elemento
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
!
! ** Viga Principal **
!Lateral Exterior
REAL,1
AMESH,1,99,1
!
!Lateral Interior
REAL,2
AMESH,200,299,1
!
!Base
REAL,2
AMESH,400,499,1
!
!Topo
REAL,2
Amesh,100,199,1
!
!Vao Central
REAL,5
AMESH,300,399,1
!
!Cutelos          !Se o numero de cutelos for par, a espessura do ultimo cutelo é metade
!da espessura dos restante
*if,POUI,EQ,2,THEN
REAL,7
AMESH,500,599,1
*endif
!
*if,POUI,EQ,1,THEN
REAL,7
AMESH,500,500+NC,1
    *GET,NCI,RCON,7,CONST,1
    R,8,(NCI/2)
    REAL,8
    ASEL,S,,501+NC,502+NC,,0
    !CLRMSHLN
    AMESH,501+NC,502+NC
    ASEL,ALL,,,,,
*endif
!
!
! ** Viga Secundaria **
!Lateral exterior
REAL,3
AMESH,600,699,1
!
!Lateral Interior Secundaria

```

```

REAL,4
AMESH,800,899,1
!
!Base Secundaria
REAL,4
AMESH,900,999,1
!
!Topo secundario
REAL,4
AMESH,700,799,1
!
!Vao central 2
REAL,6
AMESH,1000,1099,1
!
! ** Fim geração da malha **
! *****
!
!
! ** Aplica os carregamentos e constrangimentos **
! *****
!
!Deslocamento Vertical
DK,2,UZ
!
!Simetria
LSEL,S,,,1,7,,
DL,ALL,,SYMM,,,
!
*if,POUI,EQ,1,THEN
LSEL,S,,,8,14,,
*endif
!
*if,POUI,EQ,2,THEN
LSEL,S,,,15,21,,
*endif
!
DL,ALL,,SYMM,,,
LSEL,ALL,,,,,
!
!Pressão
!Viga principal
ASEL,S,,,202,299,,0
SFA,ALL,,PRES,(-(FCC))/((A-2*D1)*H)
ASEL,ALL,,,,,
!
!
! ** Inicia o cálculo **
! *****
!
/SOLU
ANTYPE,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
SOLVE
FINISH
!
!
! ** Escreve os resultados no ficheiro resultados.txt **
! *****
!
/POST1
!
! ** DEFINICAO DAS TENSÕES **
!
!Retira o valor do deslocamento e tensão no centro da VIGA1
*SET,NO_CENTRO,(NODE((A/2),0,(H/2)))
*GET,SIGMA_CENTRO,NODE,NO_CENTRO,S,EQV
*GET,UY,NODE,NO_CENTRO,U,Y
!

```

```

!Retira o valor da tensão no canto
*SET,NO_CANTO,(NODE((D1),0,(H/2)))
*GET,SIGMA_CANTO,NODE,NO_CANTO,S,EQV
!
!Retira a tensão no centro da placa interior da VIGA 1
!Se o numero de cutelos for impar temos:
!
*if,POUI,EQ,1,THEN
    *SET,NO_P,(NODE((A/2)-(((A-D1*2)/(NC+1))/2),0,(H/4)))
*endif
!
!Se o numero de cutelos for par temos:
*if,POUI,EQ,2,THEN
    *SET,NO_P,(NODE((A/2),0,(H/4)))
*endif
!
*GET,SIGMA_P,NODE,NO_P,S,EQV
!
! ** Volume **
!
ETABLE,VOLUME,VOLU,
SSUM
*GET,TVOL,SSUM,,ITEM,VOLUME
!
! ** Escreve os resultados num ficheiro de resultados **
!
*CFOPEN,resultados,txt,,
*VWRITE,'Volume'
(A8)
*VWRITE,TVOL
(E18.6)
*VWRITE,'Desloc'
(A8)
*VWRITE,UY
(E18.6)
*VWRITE,'Tensao Placa Interior'
(A8)
*VWRITE,SIGMA_P
(E18.6)
*VWRITE,'T_Centro'
(A8)
*VWRITE,SIGMA_CENTRO
(E18.6)
*VWRITE,'T_Canto'
(A8)
*VWRITE,SIGMA_CANTO
(E18.6)
!
*CFCLOS
FINISH

```